J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 47(2), 143-152(2019)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.2.143
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

# Ka밴드 평면형 능동위상배열 안테나장치 설계

한재섭[1], 김영완[2], 백종균[3], 김종필[4]

# Design of Ka-band Planar Active Phased Array Antenna

Jae-Seob Han[1], Young-Wan Kim[2], Jong-Gyun Baek[3] and Jong-Pil Kim[4]
LIG Nex1

## ABSTRACT

In this paper, we described the design of Ka-band planar active phased array antenna which is applicable for small RADAR for airborne and seeker of guided missile. The antenna consists of about 1000 array radiating elements and is designed to be within 200mm diameter. We optimized the spacing of radiating elements to allow beem steering above ± 55 degrees of Field of view, and analyzed the performance of antenna. We confirmed that the Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) of the antenna can be 94.22 dBm and receive G/T can be 1.68 dB/k through the designs of RF components and the verification of RF budget. The TX output of TR Module is designed to be over 1.3W for EIRP, and Receive noise figure of TR Module is designed to be less than 5dB for G/T.

## 초 록

본 논문에서는 항공용 소형 레이다나 유도 무기 탐색기 등에 적용이 가능한 Ka대역 평면형 능동위상배열 안테나장치를 설계한 내용을 설명하였다. 본 안테나장치는 1000개 급의 복사소자 면배열로 구성하고, 직경 200mm 이내의 크기로 설계하였다. 빔 조향 범위는 ±55° 이상 가능하도록 빔 패턴 분석을 통하여 복사 소자 간격을 정의하고 안테나 성능 분석을 수행하였다. RF 구성품 설계와 버짓 검증을 통해 안테나장치의 송신 EIRP는 94.22 dBm, 수신 G/T는 1.68 dB/k 성능으로 요구 규격을 만족할 수 있음을 확인하였다. 송신 EIRP 규격을 만족하기 위해 TRM의 송신 출력은 1.3W 급으로 설계하였고, 수신 G/T 규격을 만족하기 위해 TRM의 수신 잡음 지수를 5dB 이하가 되도록 설계하였다.

**Key Words :** Active Phased Array Antenna(능동위상배열 안테나), TRM(송수신모듈), Ka-band(Ka 대역)

## Ⅰ. 서 론

최근 레이다의 안테나장치는 수동위상배열에서 능동위상배열 안테나로, 고출력증폭장치는 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifiers)에서 SSPA(Solid State Power Amplifier)로, 주파수는 MMIC(Monolithic microwave integrated circuit) 발전에 따라 Ka, W밴드 이상까지 발전하고 있다. 단일 TWTA와 접시안테나 또는 슬롯

† Received : August 14, 2018 Revised : January 8, 2019 Accepted : January 19, 2019
[1] Researcher, [2] Researcher, [3] Researcher, [4] Researcher
[1] Corresponding author, E-mail : hanjaesub@lignex1.com
© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

배열 안테나 등은 빔조향을 위해 안테나를 회전할 수 있는 구동장치가 필요한데, 능동위상배열 안테나 장치는 구동장치 없이 전자적 빔조향 기술로 인해 상대적으로 매우 빠른 빔조향을 수행할 수 있다. 이렇게 구동장치가 없어져 크기와 무게 또한 줄어들어 항공기용이나 유도무기 탐색기 및 기상레이다 등에 적용이 용이해 지고 있다.

TWTA는 점진적으로 단일 SSPA 또는 다수로 결합된 TRM(Transmit Receiver Module)으로 바뀌어 가는 추세이고, GaN 기반의 고출력 증폭기가 발전함에 따라 고효율 SSPA가 개발되고 있다. Ka밴드 평면형 능동위상배열 안테나에 적용하기 위해서는 복사소자간 간격보다 작은 크기의 MMIC가 필요한데, 현재 기준으로 제품군이 다소 부족하고 아직까지는 GaAs 기반의 고출력 증폭 소자가 많이 이용되고 있다. 또한 전자적 빔조향을 위해 각 TRM 송/수신 경로에 위상 변위 기능이 필요한데, 이는 멀티 코어칩을 적용하여 TRM크기를 최소화할 수 있다. Ka밴드 능동위상배열 안테나에서 TRM 1채널의 크기는 많이 한정적이어서 부품과 내부 인터페이스를 구성하기 용이한 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 기판을 이용하여 TRM을 구성하는 것으로 설계하였다.

본 논문에서는 유도무기 탐색기, 항공기용 레이다 및 이동형 기상레이다 등과 같이 소형 레이다에 적용이 가능한 Ka밴드 평면형 능동위상배열 안테나 장치 설계에 대해 연구하였다. 안테나장치를 설계하기 위해 필요한 기술로 복사소자 배열 분석, TRM 설계, RF급전 및 모노펄스 비교기 설계 등은 시뮬레이션을 통해 검증하였고, 제어 구조 등을 제시하였다.

## II. 본 론

### 2.1 시스템 설계

안테나장치는 Ka밴드의 RF신호를 인가받아 고출력 증폭하여 자유공간으로 방사하는 기능을 하고, 1000개 급의 TRM을 통해 증폭된 송신 신호는 자유공간에서 빔합성을 통해 높은 출력을 얻는다. 또한, 자유 공간으로부터 수신된 신호를 저잡음 증폭하여 합성하고 RF신호를 모노펄스 비교기를 통해 합, 차 채널로 분리하여 수신 하향 변환기로 전달하는 역할을 한다.

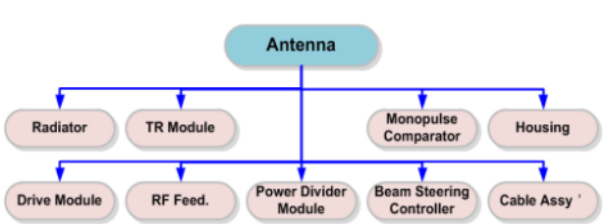


Fig. 1. Antenna family tree

Table 1. Development Specification for Antenna

| | |
|---|---|
| Operation Frequency (Bandwidth) | Ka-band (1 GHz) |
| Antenna Aperture | < 200 mm |
| EIRP | > 90 dBm |
| Directivity (Tx Uniform) | > 35 dBi |
| Directivity (Rx Taylor) | > 34 dBi |
| Sidelobe Level (Uniform) | < -15 dB |
| G/T | > 1.0 dB/k |
| The range of Beam Steering | > ± 55° |

안테나장치는 Fig. 1과 같이 복사소자 조립체, TR 모듈, 구동모듈, RF급전조립체, 모노펄스비교기, 전원분배모듈, 빔조향기, 하우징 및 케이블 조립체 등으로 구성된다. 본 논문에서는 복사소자 배열 분석, RF 시스템 구성, 제어 구조 및 인터페이스 등만 설명하였다.

안테나장치의 요구 규격은 Table 1과 같고, 이를 만족하기 위해 1024채널의 TR모듈로 구성되고, RF급전조립체를 통해 분배 및 결합된다[4]. 모노펄스 비교기 송신 경로에는 순환기가 있어서 송신신호와 수신 합 채널 신호를 분리하고, 차 채널은 방위각과 고각으로 분리하여 구동모듈로 수신 신호를 전달한다. 구동모듈은 입력되는 RF신호를 RF급전조립체를 거쳐 TR모듈을 구동할 수 있는 레벨로 증폭하고 기능 블럭도는 Fig. 2와 같다[1]. 안테나장치의 송신 버짓은 입력 +5 dBm을 인가받아, TRM 1채널의 송신 출력을 +31.2 dBm이 되도록 설계하였다. 송신 상세 버짓은 Table 2와 같다.

수신 버짓은 안테나장치의 G/T를 고려하여 설계하였고, 복사소자를 제외한 TRM 1채널 기준의 이득은 약 40 dB, NF는 4.98 dB가 되도록 설계하였다. 안테나장치의 잡음 레벨을 낮추기 위해 TRM 수신 경로 초단에 LNA 3개를 연속으로 구성하였다. 상세 수신 버짓은 Table 3과 같다.

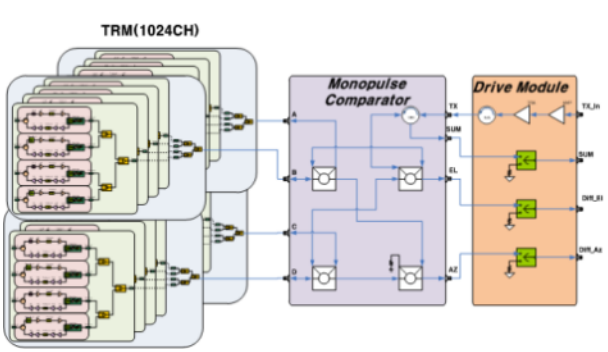


Fig. 2. Simplified RF block diagram

Table 2. Budget table of Transmitter

| No. | Item | Gain (dB) | Power (dBm) | Power (W) | Cumulative Gain (dB) |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | TX IN | | 5 | 0.003 | 0 |
| T2 | Cable | -2 | 3 | 0.002 | -2 |
| T3 | Connector | -0.3 | 2.7 | 0.002 | -2.3 |
| T4 | DRA | 20 | 22 | 0.158 | 17.7 |
| T5 | Att. | -3 | 19 | 0.079 | 14.7 |
| T6 | HPA | 19 | 38 | 6.310 | 33.7 |
| T7 | Connector | -0.3 | 37.7 | 5.888 | 33.4 |
| T8 | Cable | -2 | 35.7 | 3.715 | 31.4 |
| T9 | Connector | -0.3 | 35.4 | 3.467 | 31.1 |
| T10 | Circulator | -2 | 33.4 | 2.188 | 29.1 |
| T11 | monopulse | -12 | 21.4 | 0.138 | 17.1 |
| T12 | Cable | -1.5 | 19.9 | 0.098 | 15.6 |
| T13 | RF Feed | -30 | -10.1 | 0.0001 | -20.4 |
| T14 | Connector | -0.3 | -10.4 | 0.0001 | -20.7 |
| T15 | Divider | -12 | -22.4 | 0.0000 | -32.7 |
| T16 | Core chip | 1 | -21.4 | 0.0000 | -31.7 |
| T17 | Att. | -3 | -24.4 | 0.0000 | -34.7 |
| T18 | AMP | 18 | -6.4 | 0.0002 | -16.7 |
| T17 | Att. | -3 | -9.4 | 0.0001 | -19.7 |
| T18 | AMP | 18 | 8.6 | 0.007 | -1.7 |
| T19 | Att. | -3 | 5.6 | 0.004 | -4.7 |
| T20 | DRA | 20 | 22 | 0.158 | 15.3 |
| T19 | Att. | -2 | 20 | 0.10 | 13.3 |
| T21 | HPA | 19 | 33 | 1.995 | 32.3 |
| T22 | Circulator | -1.5 | 31.5 | 1.413 | 30.8 |
| T23 | connector | -0.3 | 31.2 | 1.318 | 30.5 |

Table 3. Budget table of Receiver

| No. | Item | Component | | Accumulate | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Noise Figure (dB) | Gain (dB) | Noise Figure (dB) | Gain (dB) |
| R1 | RX In | 0.3 | -0.3 | 0.30 | -0.30 |
| R2 | CIR | 1 | -1 | 1.30 | -1.30 |
| R3 | 50 ohm line | 0.5 | -0.5 | 1.80 | -1.80 |
| R4 | LIMITER | 1 | -1 | 2.80 | -2.80 |
| R5 | LNA | 2.1 | 19 | 4.90 | 16.20 |
| R6 | ATT | 3 | -3 | 4.93 | 13.20 |
| R7 | LNA | 2.1 | 19 | 4.97 | 32.20 |
| R8 | ATT | 3 | -3 | 4.98 | 29.20 |
| R9 | LNA | 2.1 | 19 | 4.98 | 48.20 |
| R10 | ATT | 3 | -3 | 4.98 | 45.20 |
| R11 | SW | 1 | -1 | 4.98 | 44.20 |
| R12 | Core Chip | 6 | 2 | 4.98 | 46.20 |
| R13 | Divider | 6 | -6 | 4.98 | 40.20 |
| R14 | 16 way Divider | 12.0 | -12.0 | 4.98 | 28.2 |
| R15 | Cable | 1.5 | -1.5 | 4.98 | 26.70 |
| R16 | Connector | 0.3 | -0.3 | 4.98 | 26.40 |
| R17 | Monopulse Comparator | 6.0 | -6.0 | 4.99 | 20.40 |
| R18 | RF Switch | 2.0 | -2.0 | 5.00 | 18.40 |
| R19 | Connector | 0.3 | -0.3 | 5.00 | 18.10 |

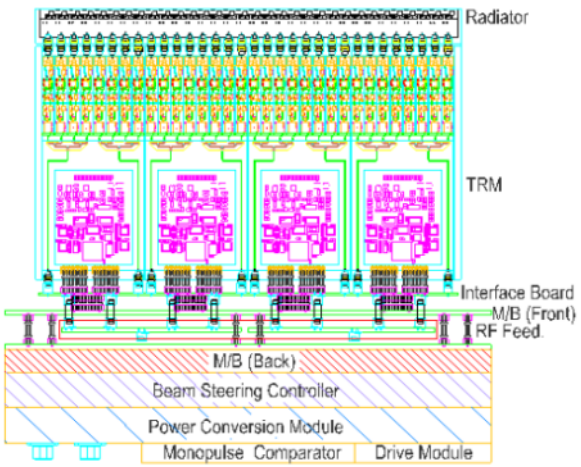


Fig. 3. Antenna internal structure

안테나장치의 내부 형상은 Fig. 3과 같고 안테나 직경 200mm 이내를 만족하기 위해 최대 직경 196 mm로 설계하였다. Fig. 3에서 윗부분은 복사소자 부분이고, 그 아래가 TRM, 인터페이스 보드, 전면 모체판, RF급전조립체, 후면 모체판, 빔조향기 등으로 형상 설계하였다.

안테나장치의 내부에 TRM은 8채널이 4개의 블록 형태로 구성하였고, 전체 1024채널로 구성하였다. 전원, 제어 및 RF 신호 전달을 구성하는 인터페이스 보드는 TRM 내 위치한다. 장치 내부의 RF커넥터는 40 GHz 이하 특성을 갖고, 조립성을 고려하여 Blind mating 타입인 SSMP 커넥터로 선정하였다. 전원제어 커넥터는 사이즈와 여러 채널의 기구적 간섭을 고려하여 1.27mm Pitch 커넥터로 선정하였고, 전원제어커넥터는 일반 D-SUB 커넥터로 적용하였으며, 외부의 RF 커넥터는 K-Connector (2.92mm)로 적용하였다. 클럭은 멀티 코어칩 제어와 FPGA에 공급할 수 있도록 40 MHz로 설정하였다.

안테나장치의 내부 전원은 외부 전원공급장치로부터 +9 V, +5 V, +3.3 V, -5 V의 전원을 받아서 빔조향기 및 TRM에 직접 공급받아 사용한다. 제어는 외부 시스템으로부터 40 MHz 클럭과 HDLC(High-level Data Link Control 통신을 통해 운용 모드, 빔조향, 주파수, 타이밍 정보, 펄스 개수 등 관련 정보를 받아서 안테나장치의 빔조향기에서 빔연산 및 타이밍 생성동작을 수행한다. 운용모드 및 빔조향 정보는 빔조향기의 LUT (Look Up Table)의 값과 빔연산에 사용되어 TRM 송/수신 위상 및 수신 이득 제어에 적용된다[2]. 펄스 개수, Tx Enable 및 Rx Enable 신호 정보도 TRM에 내부 시리얼 통신을 통해 인가된다. 수백 kHz PRF 이상 동작 시 Tx/Rx 위상 정보를 매 펄스마다 정보를 전달하기 위해서는 멀티 코어칩에 40 MHz로 시리얼 데이터가 전달되어야 하기에 안테나장치 시스템 클럭을 40 MHz로 선정하였다.

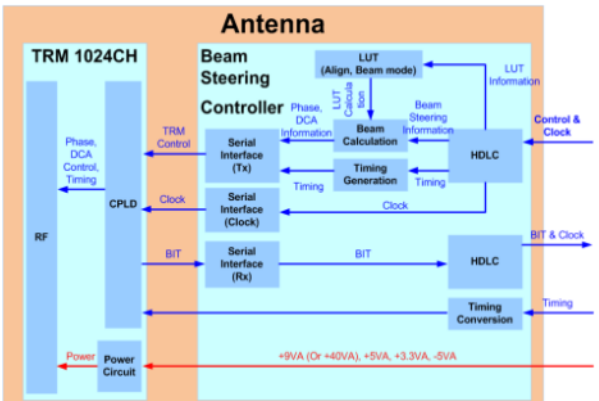


Fig. 4. Functional block diagram

TRM에서는 송신 bit를 시리얼 데이터로 빔조향기에 전달하고, 빔조향기는 전 채널의 정보를 수집하여 매 Burst마다 시스템 HDLC 통신을 통해 전달한다.

능동위상배열안테나에서는 각 채널의 송수신 위상 보정이 매우 중요하다. 특히, TRM내 HPA에서 발열이 많이 발생하는데, 온도 변화에 따라 위상 변화가 생기고, 채널 간 송/수신 경로의 위상 오차가 발생하면 빔 패턴 성능 열화의 원인이 된다. 이를 보상하기 위한 보정 방안은 여러 가지가 있는데 보정 경로를 삽입하는 방안, 복사 소자간의 Mutual Coupling을 이용한 방안, 제어부에 온도에 따른 위상 보정값을 사전에 측정/저장하여 센싱된 온도에 따라 위상 보정값을 적용하는 방안 등이 있다. 본 연구에서는 마지막 방안을 고려하였다. 온도에 따라 위상을 보정하는 방안은 물리적인 보정 경로가 필요 없고, 복잡한 연산이 필요 없어서 시스템이 간단해지는 장점이 있다. 하지만 실제 송신되는 신호로 보정하는 방법이 아니기 때문에 정확도는 많이 낮아진다. 보정 방법은 TRM 제작 시 샘플 TRM을 선정하여 온도, 주파수에 따른 송/수신 위상 변화량 측정하여 제어부 LUT에 저장하고, 이를 전 채널에 적용하여 사전 측정 시간을 줄이는 방안을 적용하였다. 이를 위해서 TRM 16채널에 온도 센서 1개씩 적용하여 온도를 센싱 및 보상을 할 수 있도록 설계하였다.

## 2.2 복사소자 배열 분석

배열소자는 TRM에서 송신되는 RF신호를 자유 공간으로 방사하고 공간에서 수신된 신호를 TRM으로 전달하는 기능을 제공한다. 배열소자는 RF 신호를 송수신하는 복사소자, 기구적으로 복사소자를 장착하는 반사판으로 구성된다. 본 논문에서는 그레이팅 로브가 발생하지 않으면서 송수신빔을 형성하기 위한 배열 간격 및 개수를 적용하여 배열합성 이론에 근거한 빔성능 분석을 수행하였고, 모든 배열 소자는 이상적인 다이폴 패턴을 가정하여 분석하였다[5]. 배열구조는 안테나장치 송수신 빔성능을 최적화하기

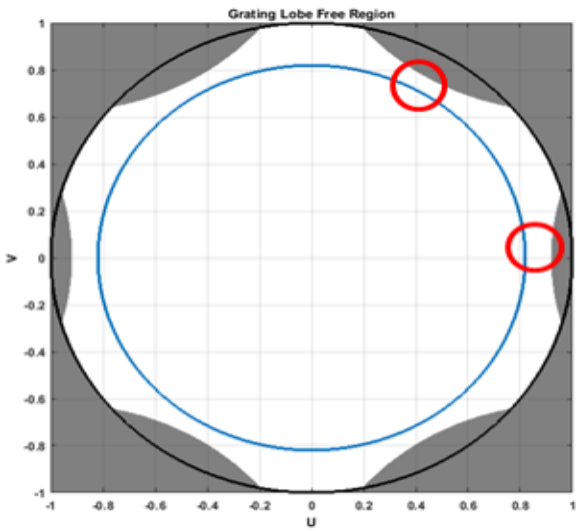


Fig. 5. Grating lobe analysis result with respect to array structure

위해 Y-Shift를 적용한 삼각 배열 형태로 구성하여 상대적으로 넓은 간격의 배열을 형성하였으며, 직경 200mm 이내에 배열 소자를 구성하여 최대 빔조향각 55°를 고려한 배열 소자 간격을 분석하였다. 중심주파수 Ka밴드 (대역폭 1 GHz), 빔조향 범위, 조립체 크기를 고려한 그레이팅 로브 검토 결과는 Fig. 5와 같다.

Figure 6은 최대 조향각 55° 및 안테나 직경 200 mm 이하를 고려하여 40 by 32 (가로 40개, 세로 32개) 형태로 배열을 구성한 결과이며, 간격은 각각 4.4 mm, 5.2mm를 선정하였다. 주파수는 대역 내 파장이 가장 짧아 전기적인 간격이 가장 크게 형성되는 최

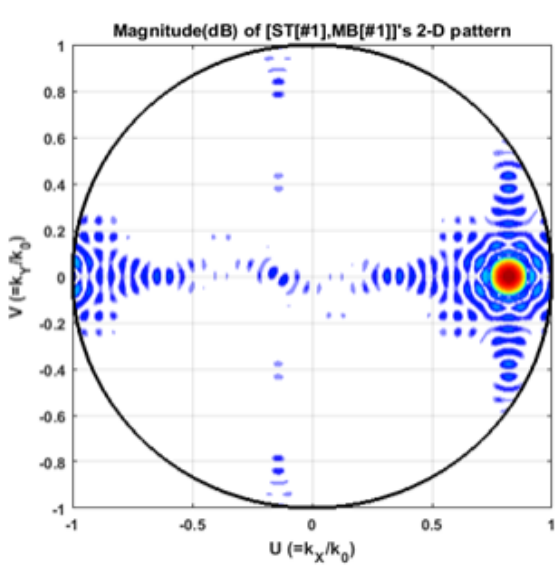


Fig. 6. 2D Beam pattern with beam steering (@ Phi=0°, Theta=55°)

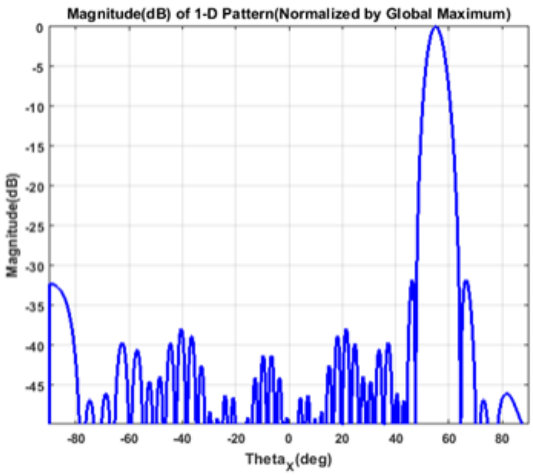


Fig. 7. 1D Cut Pattern with beam steering (@ Phi=0°, Theta=55°)

상 주파수에서 분석을 수행하였다[11]. Fig. 6의 파란색 원은 구좌표계 Theta 빔조향 범위 55°를 고려한 영역을 u-v 도메인상으로 나타낸 그림이며, 원 외곽의 음영 구역은 그레이팅 로브가 발생하는 영역으로 파란 원이 음영 구역을 침범하지 않는 범위 내에서 배열 간격을 설정하였다. Figs. 6, 7, 8, 9는 구형 좌표계를 가정하여, Phi=0°, 60° 조향 시 빔패턴을 나타내었다. Phi 조향 시 그레이팅 로브가 발생할 수 있는 조향각에서의 컷 데이터 확인 결과 설정한 배열 간격에서 그레이팅 로브가 발생하지 않음을 확인하였다. 실제 배열소자 패턴 적용 시 외곽 부엽은 저하되는 특성이 있으므로 설정 간격의 유효성은 검증된 것으로 판단된다.

최종배열 개수 및 간격은 평면 기준이 아닌 직경 200mm 원을 기준으로 배열 구성을 하였고, Table 4,

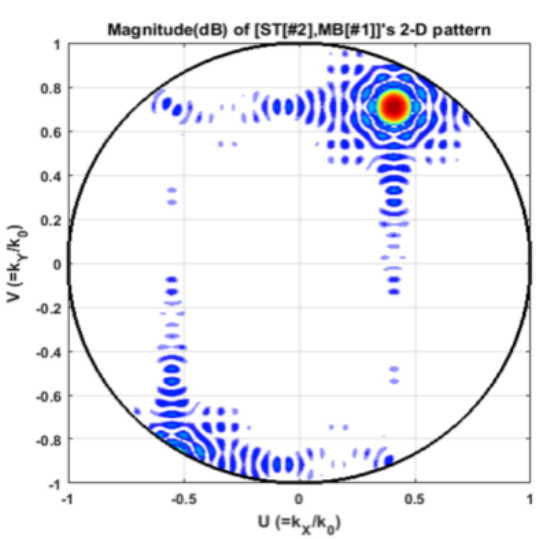


Fig. 8. 2D Beam pattern with beam steering (@ Phi=60°, Theta=55°)

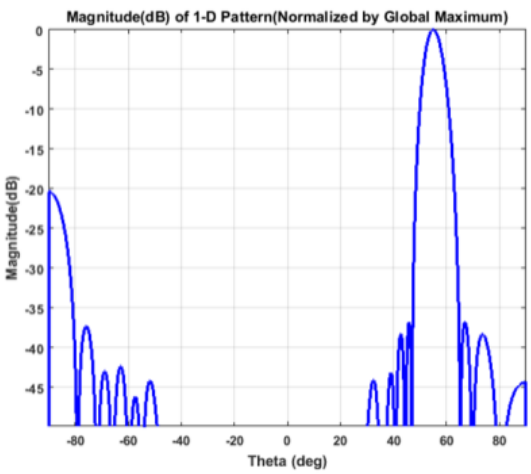


Fig. 9. 1D Cut Pattern with beam steering (@ Phi=60°, Theta=55°)

Fig. 10과 같은 배열 분포(안테나 형상)를 가지는 1024개 배열 소자로 설계하였다. 배열 분포는 집중빔 가정 시 사각 형상이 아닌 원형으로 구성하여 형상에 따라 부엽이 완화될 수 있는 구조가 될 수 있도록 하였으며, 최종적으로 TRM 설계 형상을 고려하여 원형에 가깝게 구성하였다.

다음은 선정된 배열구조에 배열 소자별 가중치를 적용하여 송수신 빔 패턴을 확인하였다. 송신빔의 경우 TRM간 송신 출력의 차이가 1 dB 이내인 점을 이용하여 집중빔을 형성하고, 개구면 모양이 직사각형이 아닌 원형에 가까운 형태를 가지므로 상대적으로 저부엽의 빔패턴을 형성할 수 있다. 집중빔 가중치로 확인된 송신 빔은 Fig. 11과 같다.

Table 4. The number of array element & interval

| Item | Horizontal | Vertical |
|---|---|---|
| The number of array element | Max. 40 | Max 32 |
| Spacing | 4.4 mm | 5.2 mm |

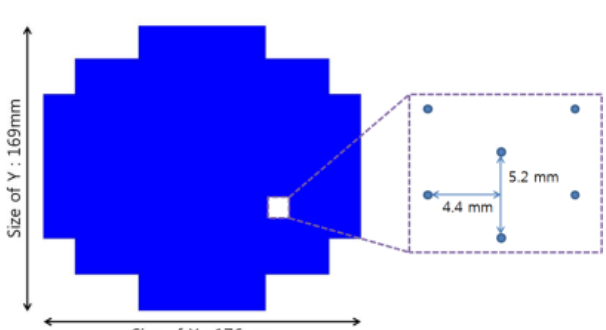


Fig. 10. Antenna Aperture

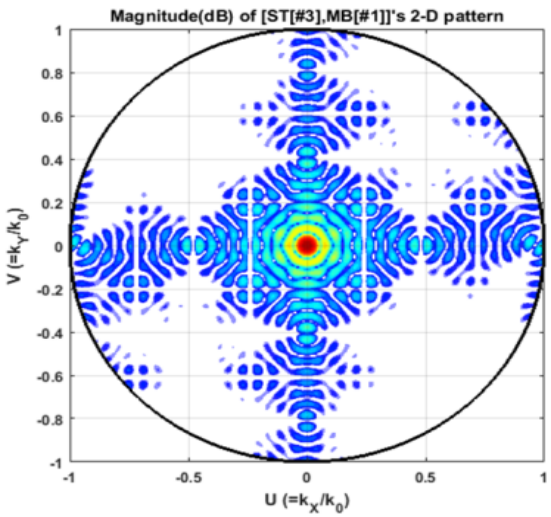


Fig. 11. Transmit beam 2D pattern

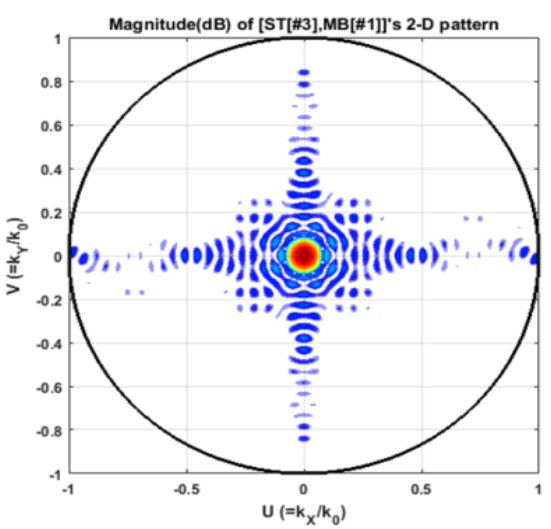


Fig. 12. 2D pattern of Receive beam

수신빔의 경우 재밍 및 클러터 영향을 최소화하기 위해 테일러 가중치를 적용하여 저부엽빔을 형성한다. 이는 TRM의 수신 이득 가변 범위를 고려하였고, 테일러 30 dB기준 수신빔은 Fig. 12와 같다.

시뮬레이션을 통해 확인한 송수신 빔 성능 결과 요약은 Table 5와 같다.

Table 5. The summary of Transmit/Receive beam simulation result

| Item | Directivity | Az. SLL | Az. HPBW | El. SLL | El. HPBW |
|---|---|---|---|---|---|
| Tx | 35.98 dBi | -19.07 dB | 2.77 ° | -17.96 dB | 3.05 ° |
| Rx | 34.75 dBi | -35.28 dB | 3.47 ° | -30.50 dB | 3.73 ° |

## 2.3 TRM 설계

TRM은 구동증폭모듈을 통해 RF송신 신호를 인가받아 고출력 증폭하여 복사소자로 전달하고, 복사소자로부터 수신된 RF신호를 저잡음 증폭하여 RF급전 및 모노펄스 비교기로 전달하는 역할을 한다. TRM은 RF부와 전원제어부로 구분할 수 있는데, RF부는 안테나장치의 빔조향을 위해 위상 변위기를 가지고, 수신빔 모드에 따라 채널별 수신이득을 가변할 수 있도록 DCA(Digital Control Attenuator)를 포함한다. 위상 변위기 기능과 DCA 기능 및 송수신 경로 변환 기능을 수행하는 멀티 코어칩을 적용하였다. 송신 출력과 수신 입력 경로를 분리하기 위해 순환기를 적용하였고[3], 종단 HPA는 Triquint 사의 2W 급 GaAs 소자를 적용하였다[10]. TRM 한 채널의 폭이 5mm 정도 되고 각 TRM에 송/수신 경로를 배치해야하므로 부품 폭이 3mm 이하인 HPA (2.79 x 2.315 mm)를 선정하였다[6]. 수신 경로는 LNA 보호를 위해 전단에 RF 리미터를 적용하였고, 수신 잡음 지수를 최소화하기 위해 LNA는 3단으로 구성하였다. 1개의 TRM은 8개의 송신 출력과 2개의 송신 입력/수신 출력 포트로 구성하였다. 전원제어부는 멀티 코어칩 제어 및 외부 인터페이스의 Pin Map 최소화를 위해 CPLD(Complex Programmable Logic Device)를 이용하였다. CPLD는 빔조향기로부터 시리얼 데이터로 명령을 수신하여 8개 TRM의 멀티 코어칩을 제어 및 타이밍 생성하는 역할을 하고, HPRF 모드시 멀티 코어칩을 제어하기 위해 40 MHz 클럭을 수신하여 멀티 코어칩에 제공하도록 구성하였다. 그리고, 전원부에는 송/수신 효율을 증대하기 위해 전원 스위칭 회로를 구성하였다(Fig. 13).

TRM은 8채널 구조의 모듈 4개가 1개의 블록형태로 조립될 수 있도록 설계하였다. TRM의 크기는 복사소자배열 간격을 고려하여 TRM 8채널 구조의 길이는 100mm, 넓이는 41.6mm, 높이는 4.4mm 이내로 설계하였다. TRM 내부에서 RF신호를 결합/분배하는 4way 결합기가 있고, TRM은 효율을 향상시키기 위해 LNA 및 DRA(Drive Amplifier)는 Rx Enable, Tx Enable 신호에 따라 드레인 전원을 On/Off 하도록 설계하였고, HPA는 송신 효율 증대와 HPRF (수백 kHz) 동작이 가능하도록 게이트 스위칭 회로를 적용하였다. HPA는 초기 전원 인가 및 차단 시 고장을

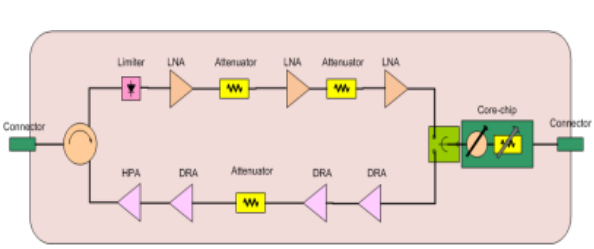


Fig. 13. Simplified block diagram of a TRM

Table 6. Development Specification for a TRM

| | |
|---|---|
| Size | 43.6 mm(W) x 100.0 mm(L) x 4.4 mm(H) |
| Frequency Band | Ka band (Bandwidth 1GHz) |
| Transmit Output | > +31.2 dBm |
| Duty | Max. 35% |
| Pulse Width | Max. 5 us |
| PRF | OOO kHz |
| Receive Gain | > 40.6 dB |
| Receive NF | < 4.98 dB |
| Tx/Rx Phase Shift Step | 5 bit (11.25 degree) |
| Rx Attenuator Step | 5 bit (0.5 dB) |

방지하기 위해 드레인 전원 인가 순차회로를 구성하였고, 이는 드레인 전압이 게이트 전압 인가 후 인가될 수 있도록 적용하였다(Table 6, Fig. 14).

TRM 내에 4개의 송수신 채널을 결합/분배하는 RF결합기는 4 Way 결합기(Wilkinson type)를 적용

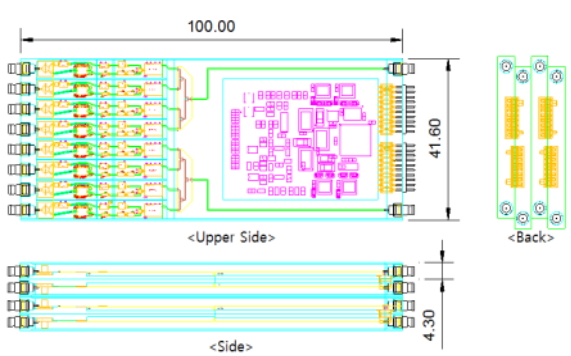


Fig. 14. TRM Layout & Structure

Table 7. The summary of divider simulation result

| Requirement Item | Requirements | Simulation Result |
|---|---|---|
| VSWR | < 1.5 : 1 | < 1.27 : 1 |
| Insertion Loss | < 10 dB | < 8.5 dB |
| Phase difference between each ports | Within 10 degree | Within 1.5 degree |
| Isolation | > 20 dB | > 35 dB |

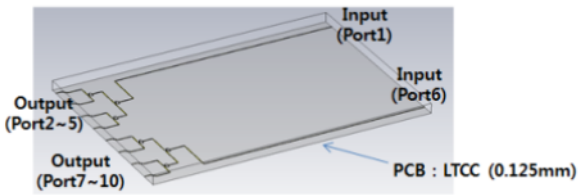


Fig. 15. Combiner structure

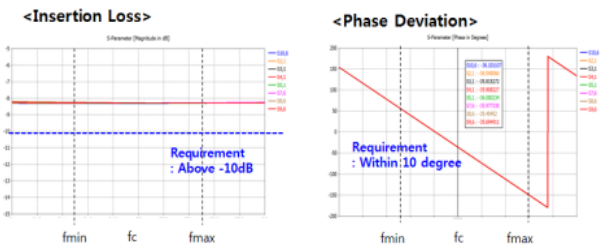


Fig. 16. The simulation result of insertion loss & phase difference

하였다. TRM 내 RF 결합기의 설계 결과는 Table 7과 같고 시뮬레이션은 3D EM시뮬레이션으로 수행하였다[8].

Figure 15는 결합기의 형상을 보여주고 있고, TRM 구조에 맞게 설계하였다. 기판은 LTCC를 적용하였고, 두께는 0.125mm로 선정하였으며 시뮬레이션 결과는 Fig. 16과 같다[7].

## 2.4 RF 인터페이스 보드 설계

인터페이스 보드는 TRM과 RF급전조립체를 연결해주기 위해 두 조립체 사이에 존재하는 보드이다. 기판은 알루미나 기판을 적용하였고, 두께는 0.127mm로 선정하였다. 인터페이스 보드는 TRM과 직교하여 조립되고, 4 way 결합기 (Wilkinson type)로 설계하였다. Table 8은 3D EM 시뮬레이션 결과요약이다.

Figure 17은 TRM 배치에 따른 인터페이스 보드의 설계형상 나타낸다.

Table 8. The simulation result of RF interface board

| Requirement Item | Requirements | Simulation Result |
|---|---|---|
| VSWR | < 1.5 : 1 | < 1.15 : 1 |
| Insertion Loss | < 10 dB | < 6.5 dB |
| Phase difference between each ports | Within 10 degree | Within 1.5 degree |
| Isolation | > 20 dB | > 32 dB |

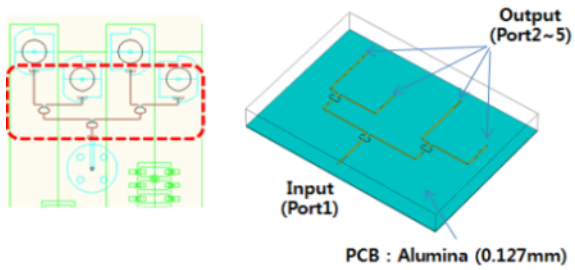


Fig. 17. Designed structure of RF interface board

## 2.5 RF 급전조립체 설계

RF급전조립체는 배열로 구성된 TRM의 효율적 빔 합성을 위해 전기적으로 연결시켜주는 급전구조이다. RF급전조립체는 16 way 결합기 (Wilkinson type)으로 구현하였고, 기판은 알루미나 기판 두께 0.127 mm로 선정하였다. Table 9는 3D EM 시뮬레이션 결과 요약이다(Figs. 18-20).

## 2.6 모노펄스 비교기 설계

수신 빔 정확도를 향상시키기 위해 모노펄스 방식을 적용하였고, Rat-Race 구조로 설계하였다[9]. Rat-Race 구조는 0도 하이브리드 커플러와 같은 반전력

Table 9. The summary of Simulation result RF divider

| Requirement Item | Requirements | Simulation Result |
|---|---|---|
| VSWR | < 1.5 : 1 | < 1.15 : 1 |
| Insertion Loss | < 20 dB | < 14.5 dB |
| Phase difference between each ports | Within 10 degree | Within 7 degree |
| Isolation | > 20 dB | > 25 dB |

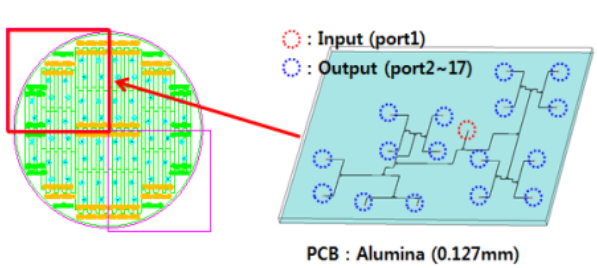


Fig. 18. Design of 16-Way combiner

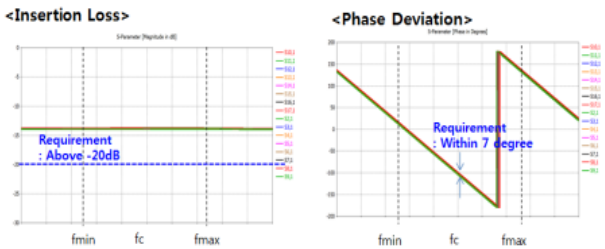


Fig. 19. The simulation result of insertion loss & phase difference

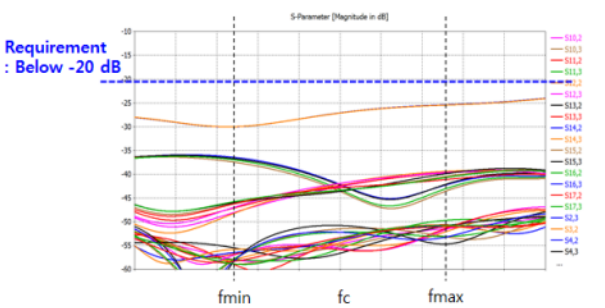


Fig. 20. The simulation result of isolation between each ports

분배기로서 애용되는데, 차이점은 분배되는 신호 전력이 180° 위상차를 가진다는 점이다. 4개의 Rat-Race를 이용하여 수신된 4분면의 신호를 합, 차-고각, 차-방위각으로 분리할 수 있도록 설계하였고, 합 채널은 송신 경로와 분리될 수 있도록 설계하였다. 모노펄스 비교기의 3D EM 시뮬레이션 결과 요약은 Table 10과 같다(Fig. 22).

Figure 21은 모노펄스 비교기의 설계 형상으로 알루미나 기판에 두께는 0.127mm를 적용하였고, 상/하 2층 구조로 설계하였다.

Table 10. Requirements for mono-pulse comparator

| Requirement Item | Requirements | Simulation Result |
|---|---|---|
| VSWR | < 1.5 : 1 | < 1.2 : 1 |
| Insertion Loss | < 10 dB | < 7 dB |
| Phase difference between each ports | Within 10 degree | Within 3 degree |
| Isolation | > 20 dB | > 32 dB |
| Sum/Del Amplitude Difference | > 30 dBc | > 35 dBc |

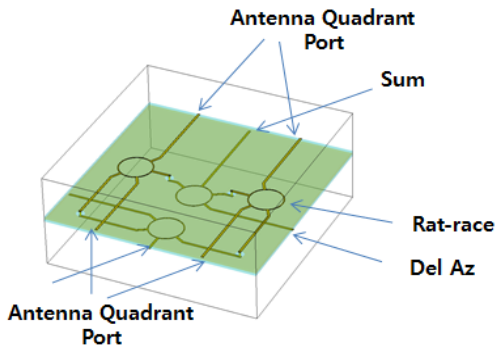


Fig. 21. Design of mono-pulse comparator

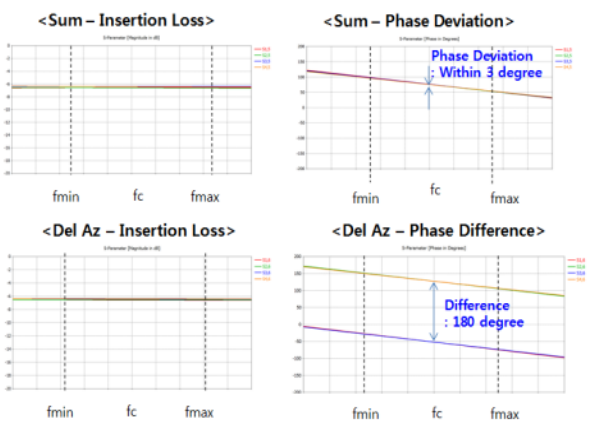


Fig. 22. The simulation result of insertion loss & phase difference

## 2.7 안테나장치 성능 예측

본 논문에서의 설계 결과를 종합하면 Table 11과 같이 안테나 성능을 예측할 수 있다. 안테나 직경은 196mm에 EIRP 90 dBm 이상, 안테나 지향성, G/T 및 빔조향 범위 등 요구 규격을 만족할 것으로 예측 가능하다. 복사 소자를 이상적인 다이폴 패턴으로 가정하였기에 본 논문에서는 방사 효율을 50%라 가정하고 안테나 이득, EIRP 및 G/T 등을 산출하였다.

# III. 결 론

최근 L밴드에서 X밴드까지의 능동위상배열안테나 장치에 대한 연구들은 많이 수행되어 왔지만, Ka밴드에서는 능동위상배열로 연구가 많이 수행되지 않았다. 본 논문에서는 Ka밴드 평면형 능동위상배열안테나장치 설계에 대한 연구를 수행하였고, 목표 규격을 만족하기 위해 복사소자는 1000개 급으로 구성하여 직경 200mm 이내에 구현될 수 있도록 설계하였다. 현재까지 알려져 있는 Ka밴드 평면형 능동위상배열 안테나장치의 성능이 없어 직접 비교는 어렵지만, 본 설계대로 개발 시 EIRP는 약 94.22 dBm, 수신 G/T는 1.68 dB/k 정도의 성능을 가지는 안테나 장치를 개발할 수 있을 것이라 판단된다. 또한, 김발을 이용한 TWTA와 슬롯 배열 안테나 구조보다 매우 빠른 (1 us 이내) 빔조향 가변속도를 얻을 수 있고, 또한 구동장치가 있는 구조보다 더 작고 가벼운 구조로 제작이 가능하여 항공용 소형 레이다나 탐색기 등에 기술적용이 가능하며, 기상레이다 등에도 확장 적용이 가능하다. 본 설계를 바탕으로 Ka밴드 평면형 능동위상배열 안테나장치 개발이 가능한 것으로 판단되고, 향후에는 본 연구를 기반으로 제작 및 시험을 통해 레이다나 탐색기 등에 적용이 가능한지 검증이 필요하다.

Table 11. Expected performance of antenna

| Item | Transmit (Uniform) | Receive (Taylor) |
|---|---|---|
| Antenna Aperture | 196 mm | |
| TRM Output (W) | 1.3 | - |
| The number of elements | 1024 | |
| The Summation of TRM output (W) | 1331 (61.24 dBm) | - |
| Directivity (dBi) | 35.98 | 34.75 |
| Antenna Gain (dB) | 32.98 | 31.75 |
| EIRP (dBm) | 94.22 | - |
| HPBW (degree, Horizontal /Vertical) | 2.77 / 3.05 | 3.47 / 3.73 |
| SLL (dB, Horizontal /Vertical) | -19.07 / -17.96 | -35.28 / -30.50 |
| G/T (dB/k) | - | 1.68 (Uniform) |
| The range of Beam steering | +/- 55 degree | |
| The speed of Beam steering | Within 1us | |

## References

1) Merrill, I. S., *Introduction to Radar System*, McGraw-Hill., NY, USA, 2001, pp. 594~615.

2) William, L. M., and Scheer, J. A., *Principle of Modern Radar Advanced Techniques*, SCITECH PUBLISHING., NJ, USA, 2013, pp. 404~418.

3) Steve, C. C., *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Artech House microwave library,

2002, pp. 294~315.

4) Lee, J. H., Lee, S. P., and Oh, S. H., "Design of Ka-band Satellite Ground Station Antenna/RF System," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 4, No. 2, 2003, pp. 88~94.

5) Chae, H. D., Joo, J. M., Yu, J. W., and Park, J. K., "Subarray Structure Optimization Algorithm for Active Phased Array Antenna Using Recursive Element Exchanging Method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 27, No. 8, 2016, pp. 665~675.

6) Oh, H. S., "A Design and Fabrication of a Compact Ka Band Transmit/Receive Module Using a Quad-Pack," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 22, No. 3, 2011, pp. 389~398.

7) Bo, Z., "Broadband and Compact LTCC Power Divider," Electronics Letters, 2015.

8) CST Studio Suite, "CST Microwave Studio," 2017, http://www.cst.com

9) Piernas, B., "Improvement of the Design of 180° Rat-race Hybrid," Electronics Letter, 2000.

10) Triquint Semiconductor, ka band 2 W Power Amplifier, TGA4516, May 2009.

11) Constantine A. B., *Antenna Theory :Analysis and Design, 3rd Edition*, Wiley, 2005, pp. 349~356.