韓國電磁波學會論文誌 第 14 卷 第 8 號 2003年 8月 論文 2003-14-8-09

위성 중계기용 이중모드 도파관 필터의 튜닝에 관한 연구

A New Tuning Method of Dual-Mode Waveguide Filters for Satellite Transponder

이주섭 · 엄만석 · 염인복 · 이성팔

Juseop Lee · Man Seok Uhm · In-Bok Yom · Seong Pal Lee

요 약

위성 중계기의 무게와 부피를 최소화 하기 위하여 입력 멀티플렉서 및 출력 멀티플렉서에 사용하는 채널 필터는 이중모드 도파관 필터를 많이 사용한다. 또한 입력 멀티플렉서는 일반적으로 채널이 서로 독립적이기 때문에 이에 사용하는 채널 필터는 이중종단형으로 설계하며, 매니폴드(manifold) 형태의 출력 멀티플렉서의 경우 채널 필터는 단일종단형으로 설계한다. 본 논문에서는 위성 중계기에 많이 적용되는 단일종단 및 이중종단 이중모드 도파관 필터의 튜닝 방법에 관하여 기술하였다. 필터의 튜닝은 한쪽면이 단락된 더미 공동(dummy cavity)을 이용하며, 측정된 반사계수의 위상 응답을 계산된 이론치에 정합시키는 과정으로 튜닝을 진행한다. 이러한 튜닝방법을 4차 이중종단 이중모드 타원응답 필터와 6차 단일종단 이중모드 타원응답 필터에 적용하여 튜닝함으로써 제안한 튜닝방법의 유용성을 확인하였다.

Abstract

For mass and volume reduction, input demultiplxer and output multiplexer of satellite transponder widely adopt dual-mode waveguide filters for channel filters. Generally, channel filters of the input demultiplexer are doubly terminated and channel filters of manifold output multiplexer should be singly terminated for correct operation. This paper gives a tuning method using short-ended dummy cavity for dual-mode cavity filters. Tuning is based on the match of the computed and measured phase response of reflection coefficient. This proposed method is applied to 4-pole dual-mode doubly terminated elliptic response filter and 6-pole dual-mode singly terminated elliptic response filter for demonstration of this new tuning method. It is shown that this method shows good agreement between the experimental and computed results.

Key words : Doubly Terminated Filter, Singly Terminated Filer, Filter Tuning, Satellite Transponder

I. 서 론

이중모드 도파관 필터는 단일모드 도파관 필터에 비해서 부피가 작고 가볍다는 장점으로 인하여 위성 중계기의 채널 필터에 많이 적용되는 필터 형태이다. 위성 중계기의 입력 멀티플렉서의 경우 일반적으로 circulator chain을 사용한 channel dropping 방식[1]을 사용하며 이러한 경우 각 채널은 서로 독립적이기 때문에 각각의 채널의 필터는 이중종단형으로 설계한다. 또한 출력 멀티플렉서의 경우 일반적으로 부피가 작고 무게가 가벼운 매니폴드형으로 설계한다[2]. 이러한 매니폴드형 출력 멀티플렉서의 정확한 성능 구현을 위해서는 각각의 채널 필터는 단일종단형으로 설계하여야 한다[3],[4].

한국전자통신연구원 통신위성개발센터(Communications Satellite Development Center, Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI))

· 논 문 번 호 : 20030303-037
· 수정완료일자 : 2003년 7월 2일

이러한 이중모드 필터의 합성과 설계에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으나 튜닝은 여전히 시간이 많이 걸리는 작업으로 남아 있다.

1970년대 Chen에 의하여 단일종단 필터의 튜닝 방법이 제안되었다[5]. 이 튜닝방법은 필터를 두 개의 파트로 분리한 후 분리된 지점을 단락시켜 각 파트의 측정한 반사계수의 위상응답을 이론적인 계산치에 정합시키는 과정으로 튜닝한다. 도파관 필터를 두 부분으로 나눈 후 각 입력단과 출력단으로부터 튜닝을 진행하면서 필터의 분리된 부분까지 튜닝을 한다. 이러한 방법으로 모든 튜닝 나사와 결합 나사가 조정되면 분리된 부분을 다시 조립한다. 그러나 이 튜닝방법은 분리된 필터를 다시 조립하는 데 있어서 단락면이 원래의 슬롯으로 대체되기 때문에 단락면이 있던 공동의 공진 주파수의 변화가 발생하여 추가적인 튜닝이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 앞에서 언급한 추가적인 튜닝 작업을 최소화 하기 위하여 한쪽 면이 단락된 더미 공동(dummy cavity)을 이용한 이중모드 필터의 튜닝 방법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 튜닝 방법을 이용하여 4차 이중종단 이중모드 타원응답 필터와 6차 단일종단 이중모드 타원응답 필터를 튜닝하였으며 측정결과를 이론적인 응답특성과 비교하였다.

Ⅱ. 이중모드 필터의 튜닝 방법

그림 1은 n차의 in-line형 이중모드 필터의 구조와 등가회로를 나타내고 있다. 등가회로의 임피던스 변환기(impedance inverter)의 값은 정규화 결합 행렬 및 입출력 저항으로부터 얻을 수 있다[6].

입출력 슬롯 및 각 공동사이의 슬롯의 크기는 측정을 통하여 결정할 수 있다[7],[8]. 슬롯의 크기가 모두 결정되면 튜닝나사와 결합나사를 조정하여야 한다. 그림 1에서 수직, 수평방향의 나사는 튜닝나사이며, 수직, 수평방향 나사의 사이에 위치하는 나사는 한 공동내의 수직 편파와 수평 편파 상호간의 결합량을 조절하는 결합나사이다. 필터는 두개의 부분으로 분리하여 튜닝하고자 하는 공동의 뒤에 한쪽면이 단락된 더미 공동(dummy cavity)을 붙여 각각의 측정된 반사계수의 위상응답이 계산된 위

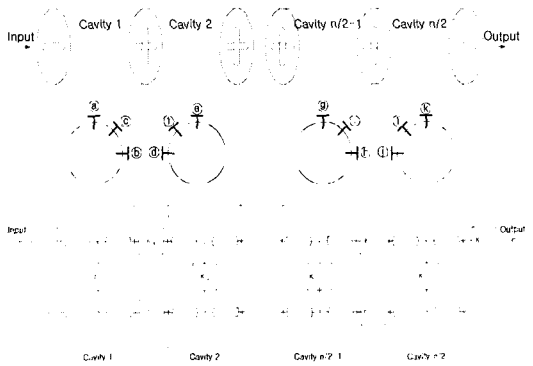


그림 1. n차의 in-line형 이중모드 필터
Fig. 1. n-pole in-line type dual-mode filter.

상응답에 정합되도록 각 공동의 나사를 조절한다. 만일 $k-1$번째 공진기와 k번째 공진기(k : 짝수)가 더미 공동 내에 존재하는 경우 입력 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_k = \frac{\det(j\lambda I - jM_k)}{\det(j\lambda I - jM_{k-1})} \tag{1}$$

이때 M_k는 결합행렬, M_{k-1}는 M_k의 첫번째 행과 열을 제거한 행렬이며, λ는 정규화 주파수(normalized frequency), I는 identity 행렬이다. 따라서 반사계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_k = \frac{Z_k - R_{in}}{Z_k + R_{in}} \tag{2}$$

이 때 필터의 입력 termination R_{in}과 입력 결합 계수 K_{01}의 관계는 참고문헌 [6]에 제시되어 있다. 식 (2)의 반사계수의 계산값으로부터 반사계수의 amplitude와 위상을 동시에 이용하여 튜닝할 수 있으나 위상을 정합시키면 amplitude는 자동으로 정합되기 때문에 일반적으로 위상만 정합시킴으로써 튜닝이 가능하다. 또한 반사계수의 계산값은 상용 회로 simulator로부터도 얻을 수 있다.

공동 1의 나사(ⓐ, ⓑ, ⓒ)는 그림 2와 같이 더미 공동을 이용하여 튜닝한다. 측정된 반사계수의 위상응답이 계산된 위상응답의 이론치와 동일해지도록 공동 1의 나사와 더미 공동의 나사를 조절한다. 위상응답의 이론치는 그림 2 구조의 등가회로인 그림 3으로부터 얻을 수 있다. 공동 1의 나사 튜닝 완료시 공동 1과 더미 공동이 모두 동조된 상태가 되어

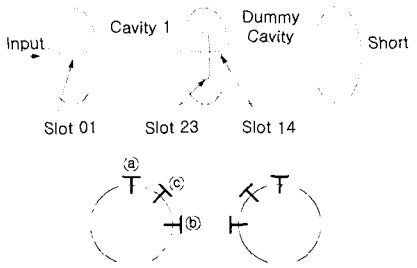


그림 2. 더미 공동을 이용한 공동 1의 나사 튜닝을 위한 구조

Fig. 2. Configuration for adjusting the screws of cavity 1 using dummy cavity.

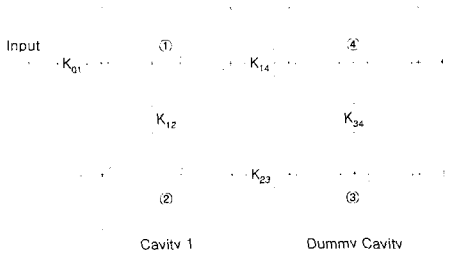


그림 3. 그림 2의 등가회로 모델

Fig. 3. Equivalent circuit model of Fig. 2.

야 하므로 더미 공동은 원래 필터 구조에서 공동 1의 뒤에 붙는 공동 2와 길이가 같은 공동을 사용하는 경우 대부분 튜닝이 가능하다.

공동 1의 나사의 튜닝이 완료되면, 공동 2의 나사 튜닝을 진행한다. 공동 2의 나사(ⓓ, ⓔ, ⓕ)는 그림 4와 같이 더미 공동을 이용하여 튜닝한다. 공동 1의 나사는 공동 1과 뒤에 있는 더미 공동이 모두 동조된 상태에서 튜닝하였기 때문에 공동 2의 나사 튜닝 시 공동 1의 나사 튜닝은 불필요하다. 공동 1의 나사 튜닝과 마찬가지로 공동 2의 나사 튜닝도 측정된 반사계수의 위상응답이 계산된 위상응답과 동일해질 때까지 공동 2의 나사와 더미 공동의 나사를 조절한다. 이 때 요구되는 위상응답은 그림 5의 등가회로로부터 얻을 수 있다.

이와 같은 튜닝과정을 필터가 분리된 지점까지 계속 진행하며 마찬가지로 출력단으로부터도 공동 n/2, 공동 n/2 - 1 순으로 튜닝을 진행하여 필터가 분리된 지점까지 진행한다. 이러한 방법으로 모든 나사의 튜닝이 완료되면 더미 공동을 분리하여 없애고 필터를 원래대로 다시 결합시킨다. 이때 측정된

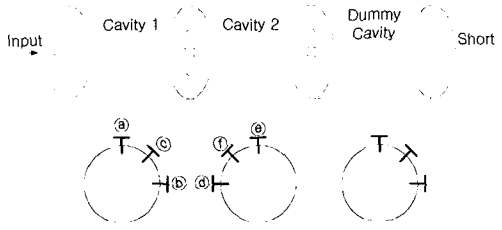


그림 4. 더미 공동을 이용한 공동 2의 나사 튜닝을 위한 구조

Fig. 4. Configuration for adjusting the screws of cavity 2 using dummy cavity.

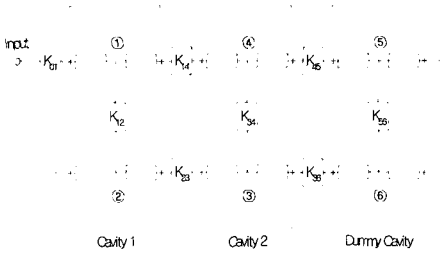


그림 5. 그림 4의 등가회로 모델

Fig. 5. Equivalent circuit model of Fig. 4.

필터 응답특성은 이론적인 필터 응답특성과 동일한 특성을 나타내어야 한다.

Ⅲ. 이중모드 필터 튜닝 결과

3-1 4차 이중종단 이중모드 타원응답 필터 튜닝

본 논문에서 제시한 튜닝방법을 중심주파수가 12.33 MHz, 대역폭이 54 MHz인 4차 이중종단 이중모드 타원응답 필터에 적용하여 튜닝하였다. 튜닝할 필터의 정규화 결합행렬($[M]$)과 입출력 저항(R_{in}, R_{out})은 다음과 같다.

$$[M]=\begin{bmatrix} 0 & 0.894474 & 0 & -0.196347 \\ 0.894474 & 0 & 0.790024 & 0 \\ 0 & 0.790024 & 0 & 0.894474 \\ -0.196347 & 0 & 0.894474 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = R_{in} = R_{out} = 1.10929$$

두 개의 공동으로 이루어진 4차 이중모드 필터는 튜닝을 위하여 두개의 파트로 분리하며, 결합행렬과 입출력 저항의 대칭성으로 인하여 분리된 각 파트는 동일한 등가회로 모델을 갖는다.

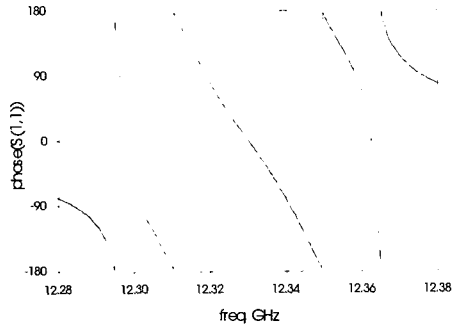
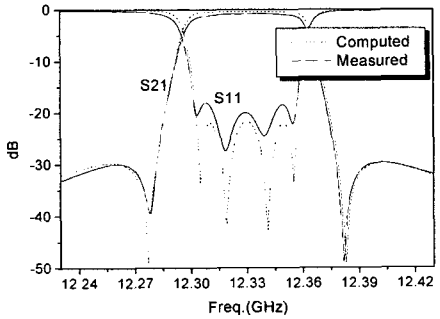
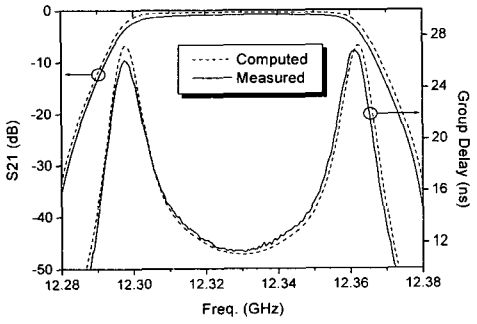


그림 6. 튜닝을 위한 반사계수의 위상응답 특성
Fig. 6. Phase response of reflection coefficient for tuning.



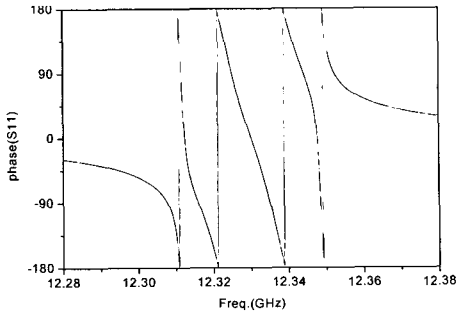
(a) 필터의 전달 특성(S_{21}) 및 반사 특성(S_{11})
(a) Transmission and reflection response of the filter.



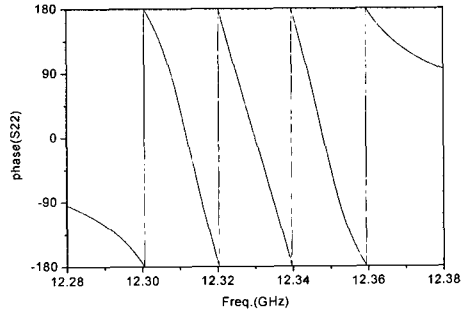
(b) 필터의 전달 특성(확대) 및 군지연 특성
(b) Scaled-up transmission response and group-delay of the filter

그림 7. 4차 이중종단 이중모드 필터의 측정결과
Fig. 7. Measured result of 4-pole dual-mode doubly terminated filter.

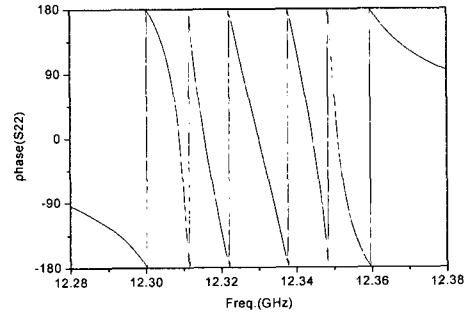
앞 절에서 언급한 바와 같이, 공동 1의 나사는 그림 2와 같이 더미 공동을 이용하여 튜닝한다. 공동 1의 나사를 튜닝하기 위하여 그림 3으로부터 반사계수의 위상응답 특성을 구하면 그림 6과 같다. 공



(a) 공동 1 튜닝을 위한 반사계수의 위상응답 특성
(a) Phase response of reflection coefficient for tuning the cavity 1



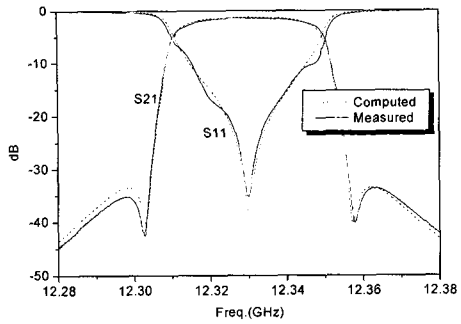
(b) 공동 3 튜닝을 위한 반사계수의 위상응답 특성
(b) Phase response of reflection coefficient for tuning the cavity 3



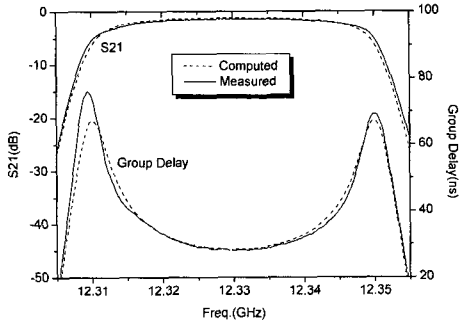
(c) 공동 2 튜닝을 위한 반사계수의 위상응답 특성
(c) Phase response of reflection coefficient for tuning the cavity 2

그림 8. 튜닝을 위한 반사계수의 위상응답 특성
Fig. 8. Phase response of reflection coefficient for tuning.

동 1과 더미 공동의 나사를 조절하여 그림 6과 같은 위상응답이 측정되면 등가회로 내의 모든 공진 모드가 중심 주파수에 튜닝이 된 상태이기 때문에 공



(a) 필터의 전달 특성(S_{21}) 및 반사 특성(S_{11})
(a) Transmission and reflection response of the filter



(b) 필터의 전달 특성(확대) 및 군지연 특성
(b) Scaled-up transmission response and group-delay of the filter

그림 9. 6차 단일종단 이중모드 필터의 측정결과
Fig. 9. Measured result of 6-pole dual-mode singly terminated filter.

동 1의 나사는 튜닝이 완료된 상태가 된다. 마찬가지로 공동 1의 튜닝방법과 동일하게 공동 2의 나사를 튜닝할 수 있다.

모든 나사의 튜닝이 완료된 후 공동 1과 공동 2를 재조립하여 추가적인 미세 튜닝 과정 없이 필터의 특성을 측정한 결과를 그림 7에 나타내었다. 측정 결과와 계산 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

3-2 6차 단일종단 이중모드 타원응답 필터 튜닝

위성 중계기의 매니폴드형 출력 멀티플렉서에 사용되는 6차 단일종단 이중모드 타원응답 필터를 본 논문에서 제시한 튜닝방법을 이용하여 튜닝하였다. 튜닝하고자 하는 필터의 정규화 결합행렬 및 입출력 결합(n_1, n_2)은 다음과 같다.

$$M=\begin{bmatrix} 0 & 0.6264 & 0 & -0.1763 & 0 & 0 \\ 0.6264 & 0 & 0.7524 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7524 & 0 & 0.6300 & 0 & 0 \\ -0.1763 & 0 & 0.6300 & 0 & 0.7847 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7847 & 0 & 1.4024 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.4024 & 0 \end{bmatrix}$$

$$n_1=0.8440,\quad n_2=1.4799$$

앞 절의 이중종단 필터의 튜닝에서와 마찬가지로 공동 1과 공동 2 사이를 기준으로 필터를 두개의 파트로 분리한 후 분리된 파트 각각의 반사계수의 위상응답을 측정하여 튜닝을 진행하였다. 각 공동을 튜닝하기 위한 위상응답을 그림 8에 나타내었다. 그림 9는 그림 8의 위상응답을 이용하여 튜닝완료 후 필터의 측정결과를 계산결과와 비교한 것을 나타내고 있다. 단일종단 필터의 경우에도 본 논문에서 제시한 튜닝방법의 적용이 가능함을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 위성 중계기의 입력 멀티플렉서 및 출력 멀티플렉서에 많이 사용되는 이중모드 필터의 튜닝 방법을 제시하였다. 한쪽 면이 단락된 더미 공동을 튜닝하고자 하는 공동에 붙여 반사계수의 위상응답을 측정함으로써 각 공동을 단계적으로 튜닝하는 방법을 기술하였다. 본 논문에서 제시한 튜닝 방법을 4차 이중종단 이중모드 필터와 6차 단일종단 이중모드 필터에 적용하여 튜닝함으로써 본 논문에서 제시한 튜닝 방법의 유용성과 정확성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 이주섭, 엄만석, 염인복, 이성팔, "Ku 대역 위성 중계기용 입력 멀티플렉서에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 14(4), pp. 393-400, 2003년 4월.

[2] M. H. Chen, F. Assal and C. Mahle, "A contiguous band multiplexer", *COMSAT Technical Review*, vol. 6, no. 2, pp. 285-307, Fall 1976.

[3] B. J. Minnis, *Designing Microwave Circuits by Exact Synthesis*, Norwood, MA: Artech House, Chap. 2, 1996.

[4] 염인복, 이주섭, 엄만석, 이성팔, "6차 단일종단 이

중모드 타원응답 필터 합성에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 14(5), pp. 506-512, 2003년 5월.

[5] M. H. Chen, "Short-circuit tuning method for singly terminated filters", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 25, pp. 1032-1036, Dec. 1977.

[6] G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, Dedham, Mass., 1980.

[7] R. S. Kwok, J. F. Liang, "Characterization of high-Q resonators for microwave-filter applications", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, pp. 111-114, Jan. 1999.

[8] A. E. Atia, A. E. Williams, "Measurements of Intercavity Coupling", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 23, pp. 519-522, Jun. 1975.

이 주 섭

1997년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
1999년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
1999년 3월~2001년 4월: LG정보통신(주) 주임연구원
2001년 5월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 연구원
[주 관심분야] 위성 중계기, 위성용 RF부품

엄 만 석

1987년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
1992년 8월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 안테나, 위성 중계기 부품

염 인 복

1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성 RF부품연구팀 팀장 선임연구원
1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여(영국 Matra Marconi사)
[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 안테나, 위성 중계기 부품

이 성 팔

1978년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1980년~현재: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 책임연구원
1986년: Polytechnic Institute of New York 전기전자공학과 (공학석사)
1990년: Polytechnic Institute of New York 전기전자공학과 (공학박사)
[주 관심분야] 위성 통신 시스템