도파관 필터 설계에 사용가능한 유전 알고리즘

Genetic algorithm for waveguide filter design

조용희
목원대학교 정보통신공학과

Yong Heui Cho
Mokwon University

요약

위성시스템의 핵심기술중 하나인 도파관 필터를 효율적으로 설계할 수 있는 방법으로 유전 알고리즘을 소개한다. 그린함수와 모드정합법을 바탕으로 도파관 스텝으로 형성한 도파관 필터를 해석하고 각 매개변수에 대해 유전 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행한다. 주파수 변화에 대한 삽입손실 특성을 계산하고 이를 실험과 비교한다.

Abstract

A genetic algorithm is introduced to design a waveguide filter which is one of essential elements of satellite system. The waveguide filter composed of waveguide steps is analyzed based on the Green's function and mode-matching technique. Genetic optimization for a waveguide filter is performed in terms of each parameter. Insertion loss behaviors versus frequency are computed and compared with measurement results.

I. 서 론

항공우주관련 위성산업은 1990년대 후반 약 400억 달러에서 2000년대 후반에는 약 1700억 달러로 급성장할 것으로 예측된다. 이러한 발전을 위해 위성을 이용한 멀티미디어(Multimedia) 서비스 같은 새로운 광대역 서비스가 생길 것으로 예측되며 이 같은 위성산업이 21세기 전체산업을 주도할 것으로 예측된다. 위성시스템 제조기술은 Bosch(독일), Matra Marconi(영국), ComSat(미국), ComDev(캐나다), ALCATEL(프랑스) 등과 같은 선진업체가 해당 기술을 선도하고 있다. 우리나라에서는 항공우주관련 위성산업을 21세기 첨단산업으로 분류하고 있으며 한국전자통신연구원이나 한국항공우주연구원에서 해당 핵심기술 개발에 박차를 가하고 있다.

전파공학관련 위성시스템의 핵심기술은 안테나 혹은 도파관(Waveguide) 필터(Filter)와 같은 위성시스템 개별 소자(Component)의 설계기술이다[1-3]. 위성시스템은 고전력을 사용하기 때문에 전송선로를 도파관으로 설계하는 것은 필수적이다. 위성시스템에 사용되는 도파관 소자에는 T접합(T-Junction), 전력 합성기(Power Combiner), 광대역 혹은 협대역 도파관 필터, 다이플렉서(Diplexer), O-Mux(Output Multiplexer) 등이 있다[1-4].

위성시스템용 도파관 소자 중에서 도파관 필터는 잘 알려진 초고주파 도파관 소자이다. 하지만, 도파관 필터는 설계 및 제작이 까다로운 핵심부품이다. 왜냐하면, 도파관 필터를 설계하기 위하여 금속구조물(Inductive Iris[4], Capacitive Iris, 튜닝 나사(Tuning Screw)[5] 등)을 구형도파관(Rectangular Waveguide)이나 원형도파관(Circular Waveguide) 속의 적당한 위치에 배치하지만, 다수의 금속구조물이 들어가기 때문에 설계변수가 많아져서 설계 시간이 많이 걸리게 된다. 설계 속도를 높이기 위하여 저주파 대역에서는 회로 매개변수(Circuit Parameter)를 이용한 근사설계를 하지만 Ku 대역 이상에서는 근사가 잘 맞지 않아서 전자기적인 해석(Full-Wave Analysis)이 필요하게 된다. 전자기적인 해석을 통한 설계는 전자기 해석법에 따라 설계 속도 차이가 심하다.

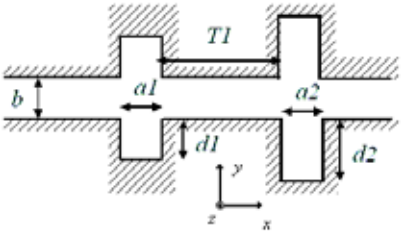
본 논문에서 사용할 전자파 도파관 스텝은 도파관 필터를 제작하기 위한 기본 요소로서 다양한 관점으로 연구가 진행되고 있다[6]-[11]. [6]에서는 도파관 스텝들이 가진 모드간의 결합 특성을 빠르게 계산할 수 있는 흥미로운 방법을 소개하고 있다. [7]은 대역저지(Band Stop) 특성을 갖는 SIR(Stepped Impedance Resonator) 구조를 도파관 필터에 적용하고 있다. [8]에서는 유전상수를 실험적으로 측정하는 방법을 도파관 스텝 관점으로 설명하고 있다. 유전상수 예측은 대표적인 역산란 문제로서 피측정매질을 도파관 스텝에 넣고 반사도를 측정한 후 수치해석적 예측을 통해 유전상수를 결정한다[8]. 전자파의 방향을 바꾸어 주는 도파관 비틀림(Waveguide Twist)을 설계하기 위해 도파관 스텝을 활용하는 방법을 [9]에서 소개하고 있다. [9]에서는 도파관 스텝을 다양한 크기로 만들어 도파관 비틀림이 광대역에서 동작하도록 설계하는 방법론을 제시

한다. [10], [11]에서는 복잡한 도파관 스텝을 해석하기 위한 다양한 경계조건을 제시하고 있다.

도파관 스텝은 도파관의 단면적이 영역에 따라 변화하는 구조이므로 모드정합법으로 해석하기 위해서는 TE-TM 모드를 동시에 사용하는 Hybrid 모드를 사용해야 한다. Hybrid 모드가 생성되면 경계면에서 고려해야 하는 경계조건은 전기장과 자기장의 접선성분 연속을 적용해야 한다. 도파관 스텝인 경우는 4개의 전자장 접선성분이 연속되어야 하므로 모드정합법 적용이 매우 복잡해진다. [10], [11]에서 제안한 방법을 따르면 전자장 접선성분과 유사한 전자장 법선성분을 사용할 수 있어 접선성분 연속보다는 쉬운 방법으로 경계조건식을 유도할 수 있다. [10]은 균일 매질인 경우를 다루고 있고 [11]은 비균일 매질로 확장하는 방법을 보여주고 있다.

본 논문에서 소개할 도파관 필터는 도파관 스텝을 사용한다. 3차원 구조는 다소 복잡하므로 문제를 간단히 하기 위해 2차원 구조의 도파관 스텝을 사용한다. 2차원 구조의 도파관 스텝은 구형도파관이 아닌 평행도파관으로 가정할 수 있다. 따라서, 모드정합법을 기반으로 한 전자장 표현식이 매우 단순해진다. 수치해석 효율을 증가시키기 위해 [12]에서 제안한 그린함수와 모드정합법을 결합시키는 중첩 T블록 방법을 사용한다. 그린함수와 모드정합법을 결합하면 그린함수와 모드정합법의 장점을 혼합할 수 있으므로 수치해석 효율이 매우 높아진다. 즉, 그린함수는 열린 영역 계산에 효과적이며 모드정합법은 닫힌 영역 계산에 효과적이므로 입사와 투과가 이루어지는 도파관의 입출력부는 그린함수를 이용하여 전자장 표현식을 만들고 산란이 일어나는 도파관 스텝부는 모드정합법을 이용하여 전자장 표현식을 만든다[12].

II. 도파관 스텝을 이용한 도파관 필터의 해석



▶▶ 그림 1. 도파관 스텝을 이용한 도파관 필터의 기하학적 구조

도파관 필터의 산란특성을 해석하는 알고리즘은 기본적으로 도파관 모델링(Modeling)의 정확성, 수치계산의 효율성, 계산시간의 단축, 해석 모델의 유효 대역폭(Bandwidth) 증대가 필요함을 알 수 있다. 이 요구사항에 적합한 것이 [12]에 있는 중첩 T블록 방법이다. 전형적인 모드정합법(Mode-Matching Method)은 도파관 불연속 구조 해석에 많이 쓰이지만, [그림 1]과 같은 도파관 스텝 해석에는 수치효율이 떨어지는 방법이다. 이와 같은 접합 구조를 효율적으로 해석하기 위해 제안된 방법이 공진기 방법(Resonator Method)이다[2]. 공진기 방법을 이용하면 다양한 도파관 구조를 해석할 수 있지만, 미지수(Unknowns)의 개수가 모드정합법에 비해 많이 늘어나고 역행렬 계산을 수행해야 하므로 정밀도가 높을수록 계산 효율에 문제가 생긴다. 공진기 방법에서 미지수의 개수를 줄이기 위해 행렬대수를 이용한 계산을 수행하지만, 행렬합, 행렬곱, 역행렬을 수행하면 계산 효율이 역시 저하된다[2].

▶▶ 그림 2. 도파관 필터의 실제 제작 모습

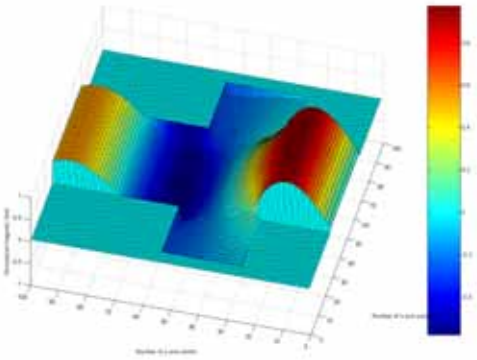
따라서, [12]에서 사용한 중첩 T블록 방법을 이용하여 수치해석적으로 매우 효과적인 전자파 산란식을 유도한다. 자세한 유도과정은 [12]를 참고할 수 있다. 하지만, 독자의 편의를 위해 최종결과식을 본 논문에 소개한다. [그림 1]의 구조에 대한 전기장 표현식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_E(x,y) = \; & T_E^{(1)}(x,y) + T_E^{(2)}(x,-y+b) \\ & + T_E^{(3)}(x-T_1-(a_1+a_2)/2,y) \\ & + T_E^{(4)}(x-T_1-(a_1+a_2)/2,-y+b) \end{aligned} \quad (1)$$

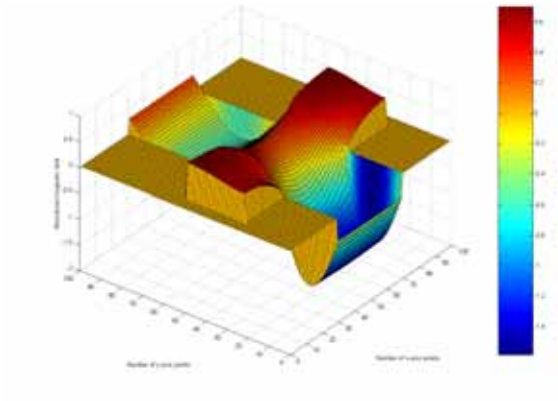
여기서

$$T_E(x,y) = E_z^I(x,y) + E_z^{II}(x,y) \quad (2)$$

식 (2)에 있는 $E_z^I(x,y)$와 $E_z^{II}(x,y)$의 표현식은 [12]에서 찾을 수 있다.



(a) 실수부



(b) 허수부

▶▶ 그림 3. z방향 자기장 분포 모습
($a_1 = 7mm,\ d_1 = 4mm,\ b = 7mm, a_2 = d_2 = T_1 = 0$)

본 수치해석 방법의 정확성은 [그림 3]을 보면 명확하다. 경계면에서 자기장 연속성을 정확히 만족하는 것을 [그림 3]에서 확인할 수 있다.

III. 유전 알고리즘을 이용한 최적화

유전 알고리즘(Genetic Algorithm)은 대표적인 전영역 최적화(Global Optimization) 기법이다[12]. 전영역 최적화 기법은 최종 목적값을 찾을 때 초기값에 민감하지 않고, 설계변수가 많아지더라도 시간만 주어지면 최종 목적값을 찾아갈 수 있다. 또한, 지역적인 최대값(Local Maximum)이 있는 경우에도 지역 최대값에만 머무르지 않고 전영역 최대값(Global Maximum)을 찾아갈 수 있다.

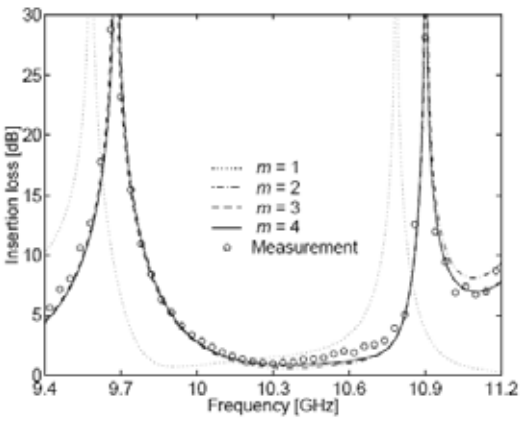
이에 반해 미분에 기반을 둔 뉴톤(Newton) 방법은 수렴속도는 굉장히 빠르지만, 초기값에 매우 민감한 국소적인 최적화(Local Optimization) 기법이다. 뉴톤 방법과 기본 알고리즘이 같은 최적화 기법은 초기값이 잘못 주어지면 해 공간(Solution Space)을 넘어 발산할 수 있고, 혹은 지역적인 최대값 주변을 주기적으로 진동하는 해를 도출할 수 있다. 즉, 미분에 기반을 둔 최적화 기법은 초기값으로 적절한 값을 설정할 수 있는 경우에만 만족할 만한 최적해를 제공한다. 최적화해야 하는 설계변수가 늘어나는 경우는 설계변수가 적은 경우보다 초기값에 더욱 민감해진다.

따라서, GA를 최적화에 적용할 때는 적합도(Fitness) 선정에 많은 노력을 기울여야 한다. 본 논문에 사용한 적합도는 다음과 같다.

$$\text{fitness} = w \times \sqrt{\frac{1}{N_p}\sum_{n=1}^{N_p}|IL_p - IL(f_p)|^{2\gamma_p}} + (1-w) \times \sqrt{\frac{1}{N_s}\sum_{n=1}^{N_s}|IL_s - IL(f_s)|^{2\gamma_s}} \quad (3)$$

여기서 식 (3)에 있는 적합도를 나타내는 여러 가지 매개변수는 [12]에 정의되어 있다.

도파관 필터의 전자파 산란식인 식 (1)을 최적화하기 위해 식(3)에 제시한 GA의 적합도를 이용하였다. 또한, 도파관 필터 구조의 초기값은 무작위로 선택하였다. 이 결과는 [그림 4]에 제시되어 있다. 본 연구방법의 명확성을 알아보기 위해 [그림 2]와 같은 도파관 필터를 제작하여 Network Analyzer를 이용하여 측정을 수행하였다. [그림 4]를 보면 수치해석 결과와 측정 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 즉, 본 논문에서 제시한 연구방법은 실험적으로도 정확함을 알 수 있다.



▶▶ 그림 4. 도파관 필터의 주파수 변화에 대한 삽입손실 특성
($a^{(1)}$ = 14.325 [mm], $a^{(2)}$ = 11.95 [mm], $d^{(1)}$ = 27.85 [mm], $d^{(2)}$ = 17.07 [mm], T = 16.54 [mm], b = 22.86 [mm])

▌참 고 문 헌▐

[1] C. Kudsia, R. Cameron, and W. C. Tang, "Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, no. 6, pp. 1133-1149, June 1992.

[2] F. Arndt, I. Ahrens, U. Papziner, U. Wiechmann, and R. Wilkeit, "Optimized E-plane T-junction series power dividers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 35, no. 11, pp. 1052-1059, Nov. 1987.

[3] X. P. Liang, K. A. Zaki, and A. E. Atia, "A rigorous three plane mode-matching technique for characterizing waveguide T-junctions and its application in multiplexer design," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, no. 1, pp. 2138-2147, Jan. 1991.

[4] V. E. Boria, M. Guglielmi, and P. Arcioni, "Computer-aided design of inductively coupled rectangular waveguide filters including tuning elements," International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 8, no. 3, pp. 226-235, May 1998.

[5] T. Rozzi, F. Moglie, A. Morini, W. Gulloch, and M. Politi, "Accurate full-band equivalent circuits of inductive posts

in rectangular waveguide," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, no. 5, pp. 1000-1009, May 1992.
[6] P. Arcioni, "Fast evaluation of modal coupling coefficients of waveguide step discontinuities," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 6, no. 6, pp. 232-234, June 1996.
[7] M. Morelli, I. Hunter, R. Parry, and V. Postoyalko, "Stopband performance improvement of rectangular waveguide filters using stepped-impedance resonators," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, no. 7, pp. 1657-1664, July 2002.
[8] S. P. Dorey, M. J. Havrilla, L. I. Frasch, C. Choi, and E. J. Rothwell, "Stepped-waveguide material-characterization technique," IEEE Antennas Propagation Magazine, vol. 46, no. 1, pp. 170-175, Feb. 2004.
[9] M. Baralis, R. Tascone, A. Olivieri, O. A. Peverini, G. Virone, and R. Orta, "Full-wave design of broad-band compact waveguide step-twists," IEEE Microwave Wireless Components Letters, vol. 15, no. 2, pp. 134-136, Feb. 2005.
[10] 조용희, "도파관 스텝 관점에서의 모드정합법 경계조건", 한국콘텐츠학회 2006 추계 종합학술대회 논문집, vol. 4, no. 2, pp. 455-457, 2006년 11월 10일.
[11] 조용희, "비균질 매질을 가진 도파관 스텝의 전자파 산란", 한국콘텐츠학회 2007 춘계 종합학술대회 논문집, vol. 5, no. 1, 2007년 5월 18일.
[12] Y. H. Cho, "Overlapping T-block analysis and genetic optimization of rectangular grooves in a parallel-plate waveguide," IEEE Microwave Guided Wave Lett., 2007.