

RF 필터 튜닝 보조 시스템의 설계 및 구현

전흥구⁺, 전준영^{*1}, 손성호^{*2}, 김동민^{*3}, 한상민^{*4}, 안달^{*5}⁺(주)테크노아, ^{*}순천향대학교⁺j110109@daum.net, ^{*1}kjr05149@naver.com, ^{*2}son@sch.ac.kr,^{*3}dmk@sch.ac.kr, ^{*4}smhan@sch.ac.kr, ^{*5}dahnkr@sch.ac.kr

Design and Implementation of an RF Filter Tuning Assistance System

⁺Heung Goo Jun, ^{*1}JunYoung Jeon, ^{*2}Seong-Ho Son,^{*3}Dong Min Kim, ^{*4}Sang-Min Han, ^{*5}Dal Ahn,⁺TECHNOAH Co., Ltd., ^{*}SoonChunHyang Univ.

요약

본 논문은 3700 ~ 4000 MHz 대역, 중심주파수 3900 MHz, 대역폭 300 MHz, 삽입손실 0.35 dB, 반사손실 20 dB 사양의 6단 RF 필터를 대상으로, MATLAB 기반 원격 계측, MFC 기반 실시간 분석, 타사 상용 RF 튜닝 로봇 연동으로 구성된 자동화 튜닝 보조 시스템을 구현하였다. 골든 샘플의 11개 스크류에 대해 0°, 180°, 360° 회전 시 측정된 Coupling Matrix 차이값을 토대로 MFC 애플리케이션에서 회전 보정량을 산출하였다. 실제 튜닝 실험에서 11개 스크류를 총 13회 회전함으로써 Resonator 계열 스크류는 모두 10° 이내, Window 계열 스크류는 20° 이내의 목표 오차 범위로 조정되었으며, 이를 통해 수동 방식 대비 높은 정밀도와 재현성을 확보하였다. 본 결과는 제안된 자동화 시스템이 복잡한 RF 필터 튜닝 과정을 효율적·일관되게 수행할 수 있음을 입증하였다.

I. 서론

RF 필터는 이동통신·레이더·위성통신 등 고주파 시스템의 핵심 부품으로, 삽입손실·대역폭·정지대역 특성이 전체 성능을 좌우한다. 그러나 3700 ~ 4000 MHz 대역(중심주파수 3900 MHz, 대역폭 300 MHz, 삽입손실 0.35 dB, 반사손실 20 dB) 사양의 6단 필터를 11개 스크류로 정밀 튜닝하는 수동 방식은 긴 시간과 숙련도 의존성으로 비효율적이다. 본 연구에서는 MATLAB 원격 계측, MFC 실시간 분석, 타사 상용 RF 튜닝 로봇 연동으로 구성된 자동화 시스템을 개발·적용하였다. 골든 샘플의 회전별 Coupling Matrix 차이를 바탕으로 산출된 보정량으로 스크류를 13회 자동 회전시켜 Resonator 계열은 10° 이내, Window 계열은 20° 이내의 정밀도를 달성하고, 수동 대비 튜닝 시간을 효과적으로 단축하였다.

II. 본론

본 논문에서 구현된 자동화 튜닝 보조 시스템은 크게 세 가지 기능 블록으로 구성되어 있다. 먼저, MATLAB 앱 디자인 환경에서 구현된 원격 계측 모듈은 벡터 네트워크 분석기(VNA)를 비동기 방식으로 제어하며 사용자가 MFC 애플리케이션에서 “측정 요청” 명령을 보내면 즉시 :CALC:DATA? SDATA 명령을 통해 S2P 데이터를 획득한다. 획득된 복소수형 S-파라미터는 Coupling Matrix 함수로 변환된다. 이렇게 산출된 Coupling Matrix는 TCP/IP 소켓을 통해 MFC 애플리케이션으로 전송된다. MFC 기반 실시간 분석 모듈은 Winsock2 라이브러리를 이용해 MATLAB 앱 디자인 프로그램과의 TCP 클라이언트 연결을 유지한다. 수신된 Coupling Matrix K_{target} 는 사전 구축된 골든 샘플의 기준 행렬 $K_{golden}(0^\circ)$ 과 비교되어 차이 행렬 ΔK_{target} 을 계산한다. 이 때 각 스크류들의 회전에 대한 민감도를 담고 있는 감도 행렬 S를 활용하여

$$\Delta\theta = S^{-1}\text{vec}(\Delta K_{target})$$

공식을 통해 보정 각도 $\Delta\theta_i$ 를 산출한다. 계산된 모든 보정값은 Resonator 계열 스크류가 최대 10° 이내, Window 계열 스크류(Window 12~Window 56)가 최대 20° 이내의 범위를 넘지 않도록 클리핑하여 안정성을 확보한다. 실제 골든 샘플 실험에서는 6단 RF 필터의 11개 스크류에 대해 회전 각도별 Coupling Matrix 차이를 측정하였다. 예를 들어, Resonator 1은 0°에서 0.018, 180°에서 0.434, 360°에서 0.872의 값을, Window 12는 각각 0.923, 0.933, 0.945의 차이를 보였으며, 나머지 스크류도 유사한 패턴을 보였다. 이러한 데이터를 기반으로 MFC 애플리케이션은 총 13회의 자동 회전 제어를 수행하였고, 그 결과 Resonator 계열 스크류는 모두 10° 이내, Window 계열은 20° 이내의 목표 오차 범위로 정확히 조정되었다. 마지막으로 로봇 연동 모듈은 산출된 $\Delta\theta$ 값을 USB-시리얼(COM 포트, 115200 bps, 8-N-1)로 타사 상용 RF 튜닝 로봇에 전송한다. 로봇 펌웨어에서 $\Delta\theta$ 값을 수신한다. 로봇 펌웨어는 각 회전각을 스텝모터 회전 스텝 수로 환산하여 다축 모터를 구동함으로써 물리적 스크류 위치를 정밀하게 보정한다. 3700~4000 MHz 대역 사양의 6단 필터를 대상으로 수행한 실험에서, 본 시스템은 수동 튜닝 대비 약 70% 이상의 시간 단축(평균 15 분 이내)을 달성하였으며, 튜닝 후 삽입손실 및 반사손실 모두 설계 스펙 내에서 안정적으로 제어됨을 확인하였다. 이러한 결과는 제안된 자동화 튜닝 보조 시스템이 복잡하고 시간이 많이 소요되는 RF 필터 튜닝 과정을 효율적이고 일관되게 수행할 수 있음을 명확히 보여 준다.

III. 결론

본 논문에서는 MATLAB 원격 계측, MFC 실시간 분석, 상용 RF 튜닝 로봇 연동의 세 모듈을 통합한 자동화 시스템을 구현하여, 3700~4000

MHz 6단 필터 튜닝 시간을 약 효과적으로 단축하고 Resonator 계열 스크류를 10° 이내, Window 계열을 20° 이내 정밀도로 조정하는 성과를 거두었다. Coupling Matrix 차이 기반의 간단한 보정 기법은 추가 최적화 없이도 다양한 필터 구조에 확장 가능하며, 향후에는 감도 행렬의 적응형 보정 및 폐회로 제어를 도입해 튜닝 정밀도와 효율을 더욱 향상시킬 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, Norwood, MA: Artech House, 1980.
- [2] R. J. Cameron, "Advanced coupling matrix synthesis techniques for microwave filters," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 51, no. 1, pp. 1-10, Jan. 2003.
- [3] H. C. Bell, "Canonical asymmetric coupled-resonator filters," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 30, no. 9, pp. 1335-1340, Sep. 1982.
- [4] S. Tamiazzo and G. Macchiarella, "An analytical technique for the synthesis of cascaded N-tuplets cross-coupled resonators microwave filters using matrix rotations," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 53, no. 5, pp. 1693-1698, May 2005.