

위상배열을 이용한 전자파 발생 및 탐지에 관한 연구

南相郁 서울대 전자공학과 교수,
공학박사

여기에 소개된 글 4편은 지난 8월 24일부터 9월 3일까지 國科硏에서 개최된 제3회 기초연구결과 발표회에서 발췌 요약한 것이다

기초연구사업은 산·학·연 협동연구 의욕 고취와, 국방기초 과학기술 기반구축을 위해 國科硏에서 지원하고 있으며, 90년부터 8개 분야 84개 과제에 걸쳐 연구가 진행중이다

— 편집자 주 —

위상 배열 안테나는 복사소자, 위상변위기, 급전망, 위상변위기 구동장치, 빔 조향 컴퓨터로 구성되어 있습니다.

급전망은 송신기의 출력신호를 복사소자에 공급하며 빔모양과 부엽수준의 조정을 위한 개구상의 전력분포를 제공하며, 위상변위기는 배열소자에 연결되어 각 소자에서 출력되는 신호의 위상을 조절하여 복사빔의 방향을 조절하는 역할을 합니다.

위상변위기 구동장치는 위상변위기에 필요한 바이어스와 제어전압, 제어전류를 공급하며, 빔 조향 컴퓨터는 구동장치의 제어에 필요한 신호를 계산합니다.

본 연구는 복합적인 기능을 수행하는 위상 배열 레이다의 핵심 기술 분야 중에서 급전망 기술, 배열 기술, 데이터 처리 기술의 습득을 최종 목표로 하여 연구를 진행하고 있습니다.

급전망 기술에서는 최적의 공간급전형 모노펄스 혼 안테나 설치에 초점을 맞추어 1차년도에는 최적 모노펄스 혼 안테나가 갖추어야 할 조건을 조사하여, 이를 멀티모드 혼을 이용한 구현방법에 대하여 연구하였습니다.

이 경우, 방위각 방향에서는 개구면 전계가 정현파 분포를 갖게 되어 최적조건을 만족시키는 반면, 양각 방향에서의 전계분포는 균일 분포로 방위각에 비해 성능이 떨어지는 것으로 알려져 있습니다. 2차년도에서는 이러한 점을 개선하기 위하여 컬리게이션 도파관 사용을 제안하고, 이를 최적 모노펄스 혼의 설계, 해석 방법을 찾아내려고 시도하였습니다.

2차년도의 연구결과로는 먼저 컬리게이션 도파관 내에 존재하는 혼성모드를 찾아내는 프로그램을 작성하여 컬리게이션 혼에서도 멀티모드 혼과 같은 개념의 합빔과 차빔을 합성할 수 있는지 그 가능성을 살펴보았습니다.

컬리게이션 도파관내에서의 혼성모드와 모드매칭을 이용한 설계가 끝났을 때 이를 정확히 해석하기 위해 컬리게이션 혼 안테나를 일반화된 S-파라미터 법을 이용하여 해석하는 프로그램을 작성하였습니다.

3차년도에서는 2차년도의 결과를 좀더 체계화시켜서 설계 과정을 확립하고, 이것을 바탕으로 설계한 급전기를 제작 실험해봄으로써 컬러게이션 도파관을 이용한 모노펄스 혼의 설계, 제작기술을 확립하고자 합니다.

먼저 설계과정의 체계화를 위해 코루게이션 멀티모드 모노펄스 급전기를 설계할 때의 설계순서를 아래와 같이 정하였습니다.

첫째, 주파수 결정 : 레이다에 사용되는 주파수를 정합니다.

둘째, 급전 도파관의 폭과 높이 결정 : 이 단에서 방위각 방향의 모노펄스 급전기를 설계한 결과로 부터 결정합니다. 높이는 여기서 고정해 버릴 수도 있고, 필요에 따라 변수로 할 수도 있습니다.

셋째, 컬러게이션 도파관의 높이와 주름의 크기를 결정 : 사용되는 모드와 slow wave의 존재 여부로부터 결정할 수 있습니다.

넷째, 급전 도파관의 설치 위치 결정 : 필요한 모드비에 따라서 결정하는데, 이때 급전 도파관의 높이도 확정짓습니다.

다섯째, 컬러게이션 도파관이 길이 결정 : 개구면에서 각각의 모드들이 우리가 원하는 위상관계를 가지도록 합니다.

이상과 같은 순서로 설계하는데, 각 단계마다 필요한 프로그램을 작성하였고, 필요에 따라서 프로그램의 검증도 이루어 졌습니다.

그리고, 기존의 논문에 제시되어 있는 모드 차트를 이 과제에서 만들고자 하는 급전기 제작에 맞도록 변경하여 좀더 손쉽게 설계할수 있도록 하였습니다.

이론의 확인을 위해 먼저 양각방향의 모노펄스 급전혼을 설계하여 제작, 실험하고자 합니다. 양각방향의 설계만을 목적으로 한 것이므로 H-Plane에서 보았을 때 단일한 모드만이 존재하도록 폭을 결정하였습니다.

제작의 편이를 위해서 기존의 X-밴드에서 사용되는 도파관인 WR-90을 급전도파관으로 사용하도록 치수를 정하여 설계 중입니다. 또한 실제 제작시에는 임피던스정합 문제, 매직티나

커플러 등의 설계, 제작이 문제점으로 예상되어 집니다.

현재 실험용으로 설계한 급전기의 불연속면에서의 반사를 보면 구조에 따라서 상당히 큰 값의 반사 계수를 가짐을 알 수 있습니다.

또한 합모드를 만들 때와 차모드를 만들 때의 반사계수에 차이가 있으므로, 일반적으로 전송선의 임피던스정합 방법과는 다르게 취급해야 합니다.

일반적으로 도파관의 기본모드에 관한 매칭은 도파관의 구조에 약간의 변형을 주거나, 정합용 스테브를 이용해서 실험적으로 매칭을 시킬 수 있습니다.

기존의 연구는 이것과는 다른 구조의 모노펄스 급전기지만, 실험적인 방법으로 원하는 주파수 대역에서 SWR 1.3정도의 반사계수를 가지도록 할수 있었다고 합니다. 이번 연구의 실험용 급전기의 경우도 우선은 실험에 의해서 매칭을 시킬 예정입니다.

급전기의 뒷부분에는 변형된 매직티나 모레노 커플러(Moreno Coupler)와 같은 부품들이 사용되는 데, 변형된 매직 티에 관한 해석은 상용화된 전자파 해석을 이용해서 해석해 볼 예정이고, 커플러의 경우는 모멘트법을 이용한 해석 방법을 통해 설계 데이터를 확립하고 이를 제작해 볼 계획으로 있습니다.

현재는 도파관의 두께를 무시한 단일 슬롯 도파관 결합기를 해석하여 프로그램하고 있습니다. 이와 같이 설계된 급전안테나의 제작과 실험은 후반기에 수행할 예정입니다.

위상배열 안테나 분야에서는 배열시 안테나의 반사계수와 복사특성 해석에 초점을 맞추었으며, 복사소자로는 구형도파관 안테나를 선정하였습니다.

1차년도에서는 구형도파관들이 직사각형 격자형태로 무한배열된 위상배열 안테나의 반사계수와 복사패턴을 계산하는 프로그램을 완성하였으며, 실제의 수치계산을 통해서 각종 구조변수들인 도파관 단면크기, 배열간격, 유전체 매개와 덮개들의 영향을 살펴본 바 있습니다.

이러한 1차년도 연구결과를 바탕으로 2차년도에는 무한개의 구형도파관들이 경사진 격자 구조로 배열되어 있을 때 경사각에 따른 반사계수와 복사패턴의 변화를 해석할 수 있는 이론적인 근거를 기술하였으며, 관계식들을 정리하였습니다.

그런데, 실제 위상배열 안테나의 소자 개수는 유한하므로 가장자리에 있는 소자들에는 무한 배열시와는 달리 플로켓 모드 이론을 적용하기 어렵습니다. 따라서 이번 연구에서는 이러한 유한한 소자 개수가 반사계수와 복사패턴에 미치는 영향도 살펴보았습니다.

먼저 해석상의 어려움을 피하기 위하여 무한도체 평면에 유한개의 평형평판으로 된 도파관들로 구성된 위상배열 안테나 문제를 다루었으며, 이러한 경우에 대한 반사계수와 복사패턴을 계산할 수 있는 이론적인 유도과정과 결과식을 기술하였습니다.

이를 프로그램화하여 여러가지 경우에 대한 수치계산 결과를 보였으며, 특히 위상배열 안테나를 구성하는 각종 구조변수들인 도파관 단면크기, 배열간격, 배열 경사각, 유전체 마개와 덮개의 비유전율과 두께, 배열소자의 개수 등이 반사계수와 복사패턴에 미치는 영향에 대해 자세히 검토하였습니다.

또한 2차원 배열에서 양쪽 배열이 유한한 경우의 해석방법을 현재 연구 중에 있습니다.

시스템의 운용 및 데이터 처리기술

위상배열 안테나 레이더에서는 기계적 관성에 관계없이 레이더 빔의 신속한 조향이 가능하기 때문에 측정을 원하는 목표나 그 목표에 대한 측정시간, 측정빈도를 상황에 대응해서 선택할 수 있게 됩니다.

이러한 능동적 추적이 가능한 레이더 체계의 효과적 운용을 위해서는 기계적 주사 안테나 레이더의 추적 및 탐색체계 설계의 경우와는 다른 새로운 문제들에 대한 검토가 요구됩니다.

여기서는 이러한 문제들에 대한 검토와 함께

위상배열 레이더 체계능력의 효율적 배분을 위한 3차원 목표 추적 알고리즘의 설계와 표본화 빈도 제어에 관한 연구를 수행하였습니다.

1차년도 연구에서는 위상배열 레이더의 운용과 관련해서 추적 좌표계, 추적 알고리즘, 표본화 빈도의 결정, 데이터 연계, 탐지능력의 향상, 그리고 빔조향 제어에 대한 일반적인 기술 검토를 수행하였습니다.

또한 목표의 기동과 목표거리에 따라 표본화 빈도를 가변할 수 있도록 한 3차원 추적 알고리즘 설계의 방법론을 제시하였습니다.

위상배열 레이더에서 목표의 추적을 위해서는 추적목표의 위치를 예측해서 그 위치에 빔을 조향할수 있어야 합니다. 동시에 다중 목표 추적을 가능하도록 해야 하기 때문에 이러한 위치 예측 알고리즘은 추적오차를 크지 않게 유지하면서 계산이 간략하도록 해야 합니다.

여기서는 거리, 방위각과 고각에 대한 분리된 Kalman 필터로 추적 필터를 구성했습니다. 그리고 표본화 빈도는 대체로 목표까지의 거리가 가까와질수록 그리고 기동 가속이 클수록 증가되도록 했습니다.

즉, 거리와 기동에 관계없이 각도 예측오차를 대략 일정하게 유지할수 있도록 표본화 간격을 정해주게 됩니다. 이러한 표본화 속도의 가변은 다중표적 추적에서 안테나 능력의 각 표적에 대한 균형적 배분을 가능하게 합니다.

한편, 클리터 상황에서 다중 목표 추적을 위한 데이터 연관 방식으로 최근접 방식과 다중가설 추적 방식을 구성하고, 연관성능의 비교를 통해서 다중가설 추적방식이 표적-항적의 잘못된 연계를 줄이는데 매우 효과적임을 확인했습니다.

2차년도 연구에서는 구형 평면배열 안테나의 측정모델을 도입하고 거리방향속도 측정을 이용한 3차원 가변 표본화 빈도 추적 알고리즘을 설계하고 그 타당성을 여러가지 목표운동 궤적에 대한 수치실험을 통해 확인했습니다.

3차원 추적 필터로는 시선방향과 안테나 좌표축에 분리된 구성을 이용하고, 기동상태의

분류를 위하여 각 축방향에 대한 Kalman 필터의 정규화된 측정 예측오차 제곱과 정규화된 추정 가속도 제곱을 이용합니다.

그리고, 목표거리와 분류된 기동상태에 따라 추적 필터의 운동과정잡음 크기와 표본화 빈도를 선택합니다. 특히 거리방향속도 측정을 이용한 경우, 기동상태 분류를 위한 임계값의 결정에 표본화 간격의 변화를 고려한 방법을 제안하고 이용하였습니다.

기동상태의 분류를 위해서 정규화된 측정 예측오차 제곱을 기동검출 함수로 이용하였는데, 목표의 가속은 측정 예측오차에 바이어스를 발생시키고 기동검출 함수의 확률적 분포를 결정하게 됩니다.

여기서는 목표의 가속에서 비롯된 바이어스 레벨을 검출하기 위한 기동검출 함수의 확률 밀도 함수를 구하고 이것을 이용해서 예측오차의 바이어스 레벨 검출 확률 및 기동검출기 동작 특성 곡선을 구했습니다. 이를 통해 앞에서 사용된 기동검출 함수의 기동검출 특성을 확인할 수 있게 됩니다.

앞의 연구에서 제시된 바와 같이 위상배열 레이더를 위한 3차원 적응 표본화 빈도 추적 알고리즘 설계의 핵심은 목표의 기동상태에 적응하도록 추적 필터 매개변수와 표본화 빈도를 결정하고 제어하는데 있습니다.

여기서 매개변수의 추정은 실시간에서 이루어져야 하고, 또 표본화 빈도 제어에서는 안테나 부하를 최소화하도록 하는 최적 제어가 요구됩니다. 3차년도 연구에서는 추적 필터 매개변수의 실시간 추정을 통해서 안테나 부하를 최소화하는 표본화 빈도의 최적 제어 알고리즘을 제안하였습니다.

최적제어의 성능지수의 위치 예측오차에서 비롯된 안테나 빔의 손실을 고려해서 표적 추적에 요구되는 단위 시간당의 조사 회수로 합니다. 이 성능지수를 최소화하기 위해서 우리가 제안한 알고리즘은 상호작용 다중모델(IMM) 알고리즘을 이용합니다.

여기서 IMM 알고리즘은 첫째, 표적의 상태

벡터의 추정과 예측을 위해서, 둘째 표적의 운동과정잡음의 크기를 실시간 추정하기 위해 사용됩니다. 표적의 운동에 따라 적응 추정된 운동과정잡음을 이용해서 성능지수를 최소화하기 위해 요구되는 예측의 정확도를 결정하고 이에 따라 표본화 간격을 결정하게 됩니다.

제안된 알고리즘은 위상배열 레이더 추적에 적용하여 목표 궤적에 대해 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였습니다.

평가 결과를 보면 적응 표본화를 사용하지 않은 표준 Kalman 필터의 경우보다 목표의 궤적에 따라 안테나 부하를 10~40% 감소시킬 수 있었습니다.

맺는 말

위상배열 레이더 과제 제1단계를 통하여 공간급전방식 위상배열 안테나의 핵심기술인 최적급전론, 배열이론, 최적 빔 제어기술에 관한 이론적인 고찰을 수행하였습니다.

최적 급전론의 경우 기존의 급전방식의 한계를 다중모드를 도입한 컬러게이션 혼을 이용하여 극복하려고 시도하여 현재 설계중에 있고, 배열이론의 경우, 구형도파관을 직각으로 또는 경사져서 무한배열 하였을 때와 여기에 덮개와 마개를 넣을 경우의 효과를 해석하였습니다.

현재는 유한개의 안테나가 배열되었을 때의 해석방법을 연구 중에 있습니다. 위상배열레이더를 위한 3차원 적응 표본화빈도 추적알고리즘의 핵심은 목표의 기동상태에 적응하도록 추적필터매개 변수와 표본화빈도를 결정하고 제어하는데 있습니다.

1차년도에는 거리, 방위각, 고각에 대한 분리된 Kalman 필터를 구성하였으며 2차년도에는 안테나의 측정모델과 거리, 방향, 속도 측정을 이용한 알고리즘을 개발하였고 3차년도에서는 필터매개변수의 실시간추정을 통하여 안테나 부하를 최소화하는 추적알고리즘을 제안하였습니다. *