패턴 합성을 통한 단일 곡면 구조에서의 RCS 감소 기술에 관한 연구

A Study of the RCS Reduction by Pattern Synthesis for Singly Curved Structures

김우중 · 서형필 · 김영섭 · 윤영중

Woojoong Kim · Hyeong Pil Seo · Youngsub Kim · Young Joong Yoon

요 약

본 논문은 단일 곡률 곡면형 구조에서 위상 반사체를 이용하여 정면에서 대칭의 구조를 통한 위상 상쇄 간섭으로 반사를 최소화시키고, 주엽을 여러 방향으로 분리시켜 반사 크기를 낮추어 RCS를 감소시키는 방법을 제안한다. 제안된 다중 주엽 반사체는 대조군인 동일 크기와 곡률을 갖는 PEC에 비해 정면과 주엽의 반사 크기가 감소되어 mono-static 레이더 환경과 bi-static 레이더 환경 모두에서 RCS 감소 효과를 갖는다. 제안된 반사체는 단일 주엽 반사체, 이중 주엽 반사체의 중간 과정을 거쳐 다중 주엽 반사체로 설계되었고, 반사체를 구성하는 각 열의 조향각을 달리하는 위상분포를 통해서 빔의 분산을 유도하였으며, 이는 모의실험과 측정을 통하여 검증되었다. 반사체는 중심 주파수 10 GHz에서 $240 \times 180 \text{ mm}^2 (8 \times 6 \lambda^2)$ 의 크기와 곡률 $k=3.3$ 으로 제작되었으며, 측정 결과 동일한 크기와 곡률을 갖는 PEC와 비교해 최대 17 dB의 RCS 감소 특성을 보였다.

Abstract

This paper discusses the singly curved phased reflector for reduced RCS pattern, which has minimized RCS level at boresight with a null by phase cancelation and the lowered RCS level of main beam by splitting the main beam into multi directions. Considering the reduced level of boresight and main beam compared to the same sized reference PEC, this proposed multi-beam reflector can be adopted in the mono-static radar and the bi-static radar environment. The proposed reflector is a multi-beam reflector, which has different phase distributions at each row for different steering angle. It is designed through an intermediate stage of a single and dual-beam reflector. The behaviors of the designed reflectors are verified through full-wave simulation and experiment. The reflectors are designed in the frequency of 10 GHz and it has a size $240 \times 180 \text{ mm}^2 (8 \times 6 \lambda^2)$ with the curvature $k=3.3$. From the measured results, the proposed reflectors reduce the reflected power by 17 dB at boresight.

Key words : Pattern Synthesis, Curved Structure, RCS, RCS Reduction

I. 서 론

RCS(Radar Cross Section)란 레이더에서 방사된 전자기파가 사물에 반사되어 돌아올 때, 그 반사체의

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대한 깊은 감사를 표합니다(계약번호 UD090088JD).」
연세대학교 전기전자공학부(Department of Electronical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received January, 8, 2013 ; Revised February 8, 2013 ; Accepted February 19, 2013. (ID No. 20130108-010)

· Corresponding Author : Young Joong Yoon (e-mail : yjyoon@yonsei.ac.kr)

반사량을 나타내기 위한 평면 면적을 말한다. 따라서 스텔스 기술은 RCS 감소 기술을 통하여 구현될 수 있다. 일반적으로 사용되는 RCS 감소 기술은 스크린(Salisbury Screen) 또는 전자파 흡수물질을 이용하는 기술과 물체의 표면 구조를 형상화하는 기술이 있다. Salisbury 스크린은 손실을 갖는 기관 두 장을 $\lambda/4$ 간격으로 적층하여 해당 파장에서의 다중 반사를 통한 반사파들의 상쇄 간섭을 유도하여 전체 반사 특성을 0으로 만드는 기술로, 두꺼운 구조가 단점이다^[1]. 전자파 흡수 물질은 탄소 물질을 표면 처리하여, 전자파 에너지를 열로 전환하는 기술로, 고가의 유지비, 무거운 중량이 단점이다^[2]. 표면 구조의 형상화를 통한 RCS 감소 기술은 입사파를 다른 방향으로 반사시키는 방법을 이용한 기술이며, 이는 항공기 등에 적용될 경우 공기역학적 설계를 저해할 수 있다^{[3],[4]}.

최근 이러한 단점들을 보완하기 위해서 물리적으로는 평면형을 갖지만, 전기적 반사 특성을 갖는 표면에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이러한 기술로는 AMC(Artificial Magnetic Conductor)와 PEC(Perfect Electric Conductor)의 조합으로 수직 입사파의 상쇄 간섭을 통해서 RCS 감소를 획득한 방법이 있다^{[5]~[7]}. 그러나 반사각의 예측 및 조절이 쉽지 않다. 따라서 입사 평면파에 대한 반사 특성을 조절을 위해 EGS(Electromagnetic Gradient Surface)가 제안되었고, 이를 통해 평면형 구조에서 효과적인 RCS 감소 및 주엽 방향에 대한 조향이 가능하다^[8]. 그러나 이는 평면형 구조에서만 적용 가능하다.

본 논문에서는 패턴 합성을 통해 주엽의 방향을 제어하여 곡면형 구조에서 정면 방향에 대한 RCS 레벨을 감소시키는 기술을 제안한다. 조향된 주엽의 RCS 레벨의 감소를 위해 이중 주엽 반사체를 거쳐 다중 주엽 반사체의 구조를 제안하였으며, 이를 통하여 정면 방향뿐 아니라, 그 이외의 방향에 대해서 PEC 대비 전반적으로 낮은 RCS 레벨을 갖도록 하였다. 제안된 반사체는 유연성을 갖는 기관을 이용하여 설계되었으므로, 기존에 제안된 평면형 반사체와 제작 과정은 동일하다. 본문에서는 제안된 구조에 대한 기본 이론 및 설계 원리가 서술되어 있으며, 모의실험과 측정을 통한 결과를 비교하여 검증하였다.

그림 1. 원형 배열
Fig. 1. Circular array.

II. 이 론

2-1 원형 배열 이론(Circular Array Theory)

원형 배열(그림 1)의 azimuth plane에 대한 far field 전계 함수는 식 (1)과 같다.

$$E(\phi) = \sum_n V_n EL(\phi - n\Delta\varphi) e^{jkR \cos(\phi - n\Delta\varphi)} \quad (1)$$

여기서, 위상은 원의 중심을 기준으로 한다. V_n 은 n 번째 배열 소자의 급전 크기이며, k 는 전파 상수이다. $EL(\phi - n\Delta\varphi)$ 은 element factor이다. 본 연구에서 V_n 은 일정하며, 각 element factor는 무지향성 패턴을 갖는다고 가정하였다^[9].

선형 배열에서 배열을 따르는 소자에 대해 위상 천이를 적용함으로써 원하는 방향으로 빔을 조향할 수 있는 것과 유사하게 원형 배열에 대해서 각 소자에 위상 값을 계산하여 원하는 방향으로의 빔 조향이 가능하다. 원형 배열의 각 소자에 대한 적절한 급전 위상은 식 (2)에 의해서 계산될 수 있다. 따라서, ϕ_0 방향으로 빔을 조향하기 위한 급전 위상을 적용한 원형 배열의 전계 함수는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^{[9],[10]}.

$$\psi(n) = -kR \cos(\phi_0 - n\Delta\varphi) \quad (2)$$

$$E(\phi) = \sum_n |V_n| EL(\phi - n\Delta\varphi) \times e^{jkR[\cos(\phi - n\Delta\varphi) - \cos(\phi_0 - n\Delta\varphi)]} \quad (3)$$

2-2 원형 배열 반사체 설계(Design of the Circular Reflector)

곡면형 배열의 빔 조향은 각 배열 소자들의 위상 분포를 계산하여 구현될 수 있고, 이는 식 (3)에 의해

그림 2. 빔 조향을 위한 반사 위상 보상 개념도
Fig. 2. Concept of compensating reflection phase for beam steering.

서 계산될 수 있다. 이때, 곡면형 방사체가 아닌 곡면형 반사체의 경우에 그림 2와 같이 각 배열소자의 위치에 따라 입사하는 평면파와의 경로차가 발생하므로, 추가적으로 각 배열 소자의 위상 보상이 수행되어야 한다. 경로차를 보상한 위상 값은 식 (4)에 의해서 계산될 수 있다.

$$\phi_{comp} = \phi_{scan} + l_{path} \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

여기서, ϕ_{comp} 는 입사파의 경로차에 의한 위상 차를 보상한 위상이며, ϕ_{scan} 은 주엽 조향을 위하여 계산된 위상이다. l_{path} 는 입사파의 경로차를 의미한다. 이러한 계산 과정으로 보상된 위상 분포를 통하여 곡면형 반사체의 구조로 인하여 발생할 수 있는 패턴 왜곡을 최소화하여 식 (4)에서와 같이 곡면형 반사체 구조에서 의도한 ϕ_0 방향으로 빔을 반사시킬 수 있다.

레이더 파의 경우, 원거리에서 곡면형 반사체 상으로 들어오므로, $R \gg \lambda_0$, $R \approx R + \alpha$ 의 조건을 가정하는 것이 가능하다. 여기서, R 은 입사파의 레이더로부터 반사체까지의 거리이며, α 는 곡면형 구조로 인한 배열 소자의 위치에 따른 입사파 경로의 증가량을 의미한다. 따라서 공간 손실에 의하여 각 소자들로 입사된 평면파의 크기는 각 배열 소자의 위치에 관계없이 균등하다고 가정할 수 있고, 배열 소자의 위치에 따른 입사파의 크기 차는 무시될 수 있다^[11].

III. 단일 곡면 반사체 설계

본 장에서는 RCS를 감소시키기 위한 방법으로 단일 주엽, 이중 주엽의 과정을 거쳐 최종적으로 다중 주엽 반사체를 제안한다. 그 결과, RCS 레벨은 주엽 수의 증가에 따라 감소되었다. 제안된 모든 반사체는 유전율 2.2, 손실 탄젠트 0.0009, 두께 0.79 mm를 갖는 Duroid 5880 기판으로 설계되었다. 제안된 구조의 중심 주파수는 10 GHz이며, 배열 소자 간 간격은 반 파장에 해당하는 15 mm이다.

3-1 단일 주엽 반사체(Single-Beam Reflector)

단일 주엽을 위한 반사체는 앞서 제시된 절차를 통하여 설계되었다. 설계된 모든 반사체는 동일한 조건에서의 RCS 비교를 위하여, 24×9 cm²(16×6 cells)의 크기를 갖고, $k=3.3$ 의 곡률을 갖도록 하였다. 여기서, 곡률이란 반지름의 역수 값에 해당된다. 20°, 40°, 60°, 80° 방향으로의 주엽 조향을 위한 위상 분포가 식 (3)에 의해서 계산되었으며, 식 (4)에 의해서 경로 차에 의한 위상 차 보상이 수행되었다. 주엽의 조향 각에 따라 계산된 각 배열 소자의 위상 분포는 그림 3에 나타내었으며, 각 배열 소자는 계산된 위상 분포를 구현하기 위한 패치 크기를 가지고 원통형 호 형태의 기판에 그림 4와 같이 배열된다. 각 소자 간의 거리는 grating lobe를 고려하여 반파장인 15 mm로 하였으며, 16개의 패치가 x축 방향을 따라 배열되었고, y축 방향을 따라 6개의 배열이 반복되었다. 각 위상 분포를 구현하기 위한 패치 크기는 모의실험을 통해서 패치 크기에 대한 파라미터 연구를 통하여 확인하였다.

모의실험은 반사체에 평면파를 입사시켜 수행되었으며, 그림 5에 나타난 것과 같이 큰 각으로의 조향과 작은 각으로의 조향은 약간의 차이를 보인다.

그림 3. 조향각에 따른 단일 주엽 반사체의 위상 분포
Fig. 3. Phase distributions of single-beam reflectors with different steering angles.

그림 4. 조향각에 따른 단일 주엽 반사체의 구조
Fig. 4. Geometries of single-beam reflectors with different steering angles.

그림 5. 조향각에 따른 단일 주엽 조향 반사체의 RCS 패턴
Fig. 5. RCS pattern of single-beam reflectors with different steering angles.

작은 각도로의 조향의 경우, 주엽의 방향이 의도한 방향으로 구현되었다. 그러나 조향 각도가 커질수록 주엽의 방향이 의도한 방향에서 벗어나게 되고, 더 큰 조향 각도로 반사체를 설계할 경우 주엽의 레벨이 더 낮아지며, 부엽의 레벨이 증가한다. 이러한 현상은 beam broadening에 의한 것으로 볼 수 있다^[12]. 배열 이론에 따르면 극대점과 영점은 주엽의 조향각이 좌우로 변환에 따라 가시 영역(visible region) 안에서 동시에 좌우로 이동한다. 따라서 조향각에 따른 정면에서의 RCS 크기를 예측할 수는 없으나, 정면에서의 RCS 크기는 PEC보다 낮으므로, mono-static 레이더 환경에 적합하다고 할 수 있다. 그러나 단일 주엽 반사체의 경우에 PEC 반사체와 비교했을 때, 더 큰 주엽 레벨을 갖는다. 이러한 특성은

bistatic 레이더 환경에 대해서는 문제가 되며, 레이더에 의한 포착 확률을 증가시킨다. 이는 특정 방향으로의 주엽 조향 시에 해당 방향으로 에너지가 집중되어 같은 면적과 곡률을 갖는 PEC 반사체에 비해서 더 큰 주엽 레벨을 갖기 때문이다.

3-2 이중 주엽 반사체(Dual-Beam Reflector)

동일 크기와 곡률을 갖는 PEC 반사체와 비교하여 단일 주엽 반사체가 더 높은 주엽 레벨을 가지는 문제를 해결하기 위해서, 주엽의 에너지를 두 방향으로 분산할 수 있는 이중 주엽 반사체를 제안하였다. 제안된 구조의 개념은 그림 6에 나타난 것과 같고, 두 방향으로 에너지를 분산시켜 주엽 레벨을 감소시켰다. 이는 bi-static 레이더 시스템으로부터의 포착 확률의 감소를 의미한다.

제안된 이중 주엽 반사체는 $k=3.3$ 의 곡률을 갖고, 크기는 $24 \times 3 \text{ cm}^2 (16 \times 2 \text{ cells})$ 로서, $\pm 10^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 50^\circ$ 의 조향각을 갖도록 설계되었다. 설계된 이중 주엽 반

그림 6. 이중 주엽 반사체의 개념도
Fig. 6. Concept of dual-beam reflector.

그림 7. 조향각에 따른 이중 주엽 반사체의 RCS 패턴
Fig. 7. RCS pattern of dual-beam reflectors with different steering angles.

그림 8. 다중 주엽 반사체의 개념도
Fig. 8. Concept of multi-beam reflector.

표 1. 산출된 다중 주엽 반사체의 조향각
Table 1. Calculated steering angle of multi-beam reflector.

곡률	1 st row	2 nd row	3 rd row	4 th row	5 th row	6 th row
$k=3.3$	50°	31°	15°	-15°	-31°	-50°

사체의 RCS 패턴은 그림 7에 나타나 있고, 정면 방향에 대한 RCS 레벨은 모든 조향각의 경우에 대하여 PEC 반사체의 경우보다 더 낮은 레벨을 갖는다. 그러나 이중 주엽 반사체의 경우에 PEC 반사체와 비교했을 때, 더 큰 주엽 레벨을 갖는다.

3-3 다중 주엽 반사체(Multi-Beam Reflector)

다중 주엽 반사체는 PEC 반사체보다 더 낮은 주엽의 RCS 레벨을 얻기 위해 제안되었다. 그 구조의 개념은 그림 8에 나타내었고, 정면 방향에 대한 RCS 레벨을 최소화 시킬 수 있는 조향각의 산출이 추가적으로 수행되었다. 정면에서의 RCS 레벨은 식 (4)에 의해서 계산 가능하고, 조향각을 변화시켜가며 정면에서 영점을 갖는 조향각을 표 1과 같이 산출하였으며, 산출된 조향각은 제작된 다중 주엽 반사체에 적용되었다. 그림 9는 산출된 조향각을 갖는 다중 주엽 반사체의 구조이며, 그림 10은 산출된 방향

그림 9. 산출된 조향각을 갖는 다중 주엽 반사체의 구조
Fig. 9. Geometry of multi-beam reflector with calculated steering angle.

그림 10. 산출된 조향각을 갖는 다중 주엽 조향 반사체의 위상 분포
Fig. 10. Phase distribution of multi-beam reflector with calculated steering angle.

으로 빔을 조향하기 위한 위상 분포이다. 그림 11은 모의실험 결과이며, 이중 주엽 반사체는 단일 주엽

그림 11. 같은 크기와 곡률의 단일, 이중, 다중 주엽 반사체의 RCS 비교
Fig. 11. Compare with RCS pattern of single, dual, multi-beam reflector with same size.

그림 12. 제작된 다중 주엽 반사체
Fig. 12. Fabricated multi-beam reflectors.

그림 13. 측정 환경
Fig. 13. Measurement setup.

의 경우보다 주엽의 RCS 레벨이 6 dB, 다중 주엽 반사체는 이중 주엽의 경우보다 8 dB 감소하였다. 또한, 다중 주엽 반사체의 경우 주엽에서 PEC 반사체와 비교하여 RCS 레벨이 5 dB 감소하였으며, 전반적으로 PEC 반사체 대비 RCS 레벨이 감소되었다.

IV. 측 정

그림 12는 제작된 다중 주엽 반사체이다. 곡률 $k=3.3$ 이며, 반사체의 조향 각은 $\pm 15^\circ$, $\pm 31^\circ$, $\pm 50^\circ$ 이다. 실험 측정 환경은 그림 13에 나타내었다. 반사파에

그림 14. 다중 주엽 반사체의 모의실험과 측정 결과 비교

Fig. 14. Comparison of measured RCS pattern with simulation patter for multi-beam reflector.

그림 15. 같은 크기와 곡률의 단일, 이중, 다중 주엽 반사체와 PEC의 측정을 통한 RCS 비교
Fig. 15. Compare with measured RCS pattern of single, dual, multi-beam reflector and PEC with same size.

의한 간섭을 줄일 수 있도록 충분히 넓은 야의 공간에서 실험이 수행되었으며, S_{21} 을 측정하였다. 그림 14는 다중 주엽 반사체의 모의실험 결과와 측정된 결과를 비교한 것이며, 모의실험 결과와 측정 결과가 유사하였다. 그림 15는 곡률 $k=3.3$ 인 단일, 이중, 다중 주엽 반사체와 동일한 곡률과 크기를 갖는 PEC 반사체를 측정을 통해 비교한 결과이다. 다중 주엽 반사체의 경우 PEC 반사체 대비 정면 방향에서 최대 17 dB의 RCS 레벨이 감소되었으며, $\pm 60^\circ$ 방향 이내에서 PEC 반사체와 비교하여 전반적으로 낮은 RCS 레벨을 갖는다. 특히, $+30^\circ$ 방향의 RCS 레벨은 22 dB 감소하였다. 따라서, 제안된 다중 주엽 반사체는 동일 크기의 PEC 반사체 대비 mono-static 및 bi-static 레이더 환경에서 감소된 RCS 특성을 갖는다.

V. 결 론

본 논문은 mono-static 및 bi-static 환경에 대한 RCS 레벨 감소 특성을 갖는 곡면형 반사체를 제안하였다. 원형 배열 이론을 기초로 RCS 패턴을 합성하였으며, 주엽의 레벨을 낮추기 위해서 둘 또는 다수의 위상 분포를 갖도록 하였다. 또한, 반사체의 중심점을 기준으로 대칭되는 위상 분포를 구현하여, 정면에서 상쇄 간섭을 유도함으로써 RCS 레벨을 최소화하였다.

제안된 반사체는 중심 주파수 10 GHz에서 $240 \times 180 \text{ mm}^2$ 의 크기와 곡률 $k=3.3$ 으로 제작되었으며, 총 셀의 수는 16×12 이다. 제안된 반사체는 동일한 면적과 곡률을 갖는 PEC 반사체와 비교하여 평면파가 정면 입사 시 RCS 레벨이 최대 17 dB 감소됨을 확인하였다. 또한, 정면 이외의 방향에서도 곡률에 따라 PEC 반사체와 비교하여 같거나 낮은 RCS 레벨 특성을 보였다. 따라서 제안된 반사체는 PEC 반사체보다 mono-static 및 bi-static 환경에 대해 감소된 RCS 특성을 구현하였다.

제안된 곡면형 반사체는 RCS 감소를 위한 군수용 뿐만 아니라, 얇은 단면, 가벼운 중량, 용이한 제조, 경제적인 제작 비용 등의 특성을 고려할 때 민수용 곡면형 반사판 안테나로의 응용이 가능할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] L. Ronald, T. Michael, "Reflection properties of the salisbury screen", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 10, pp. 1443-1454, Oct. 1988.
- [2] H. Y. Yang, J. A. Castaneda, and N. G. Alexopoulos, "The RCS of a microstrip patch on an arbitrarily biased ferrite substrate", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 12, pp. 1610-1614, Dec. 1993.
- [3] T. Wu, "Radar cross section of arbitrarily shaped bodies of revolution", *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 5, pp. 735-740, 1989.

- [4] H. C. Strifors, G. C. Gaunard, "Scattering of electromagnetic pulses by simple-shaped targets with radar cross section modified by a dielectric coating", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, no. 6, pp. 1252-1262, Sep. 1998.
- [5] M. Paquay, J. C. Iriarte, I. Ederra, and R. Gonzalo, "Thin AMC structure for radar cross-section reduction", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 12, pp. 3630-3638, Dec. 2007.
- [6] S. Simms, V. Fusco, "Chessboard reflector for RCS reduction", *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 4, pp. 316-317, Feb. 2008.
- [7] Yong Zhang, R. Mittra, and Bing-Zhong Wang, "Novel design for low-RCS screens using a combination of dual-AMC", *APSURSI 2009*, pp. 1-4, Jun, 2009.
- [8] Y. Lim, Y. S. Kim, and Y. J. Yoon, "RCS characteristic of electromagnetic gradient surface due to incident angle and polarization", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 9, pp. 840-846, Sep. 2011.
- [9] Lars Josefsson, Patrik Persson, *Conformal Array Antenna Theory and Design*, Wiley-Interscience, New Jersey, 2006.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 3rd Ed., Wiley, New Jersey, 2005.
- [11] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2nd Ed., Wiley, New Jersey, 1998.

김 우 중

2011년 2월: 경희대학교 전자정보 학부 (공학사)
 2011년 3월~현재: 연세대학교 전기 전자공학과 석·박사 통합 과정
 [주 관심분야] Array Antenna, 전파 전파

서 형 필

2003년 2월: 해군사관학교 전자공학과 (공학사)
 2011년 3월~현재: 연세대학교 전기 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] Metamaterial 및 Array Antenna

김 영 섭

ay Antenna

2010년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
2012년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2012년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심분야] Metamaterial 및 Array Antenna

윤 영 중

원 위성통신기술연구단
1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2011년: 한국전자과학회 학회장
[주 관심분야] 안테나 및 전파전파

1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
1992년~1993년: 한국전자통신연구원