

S-대역 위성 탑재용 다중 빔 대형 안테나의 전기적 설계 연구

A Study on the Electrical Design of a Multi-Beam Large Antenna for S-band Satellite Payload

윤 소 현 · 엄 만 석 · 염 인 복

So-Heyun Yun · Man-Suk Uhm · In-Bok Yom

요 약

본 논문은 한반도 지역에 개인 휴대 단말을 사용한 보편적 통신 방송 서비스를 제공하기 위한 S-대역 위성 탑재용 다중 빔 대형 안테나의 전기적 설계 방법에 대해 연구한 것이다. 배열 소자로 급전되는 반사판 형태인 하이브리드 안테나로 다중 빔을 구현하고, 각 빔은 급전 배열의 일부를 사용하여 형성된다. 원하는 빔을 얻기 위해서는 각 배열 소자 신호의 크기와 위상을 최적화해야 하고, 이는 GO(Geometrical Optics) 및 PO(Physical Optics) 해석을 통해 이루어졌다. 또한, EIRP(Effective Isotropically Radiated Power) 요구 사항을 만족하도록 배열 소자의 개수를 최적화하였다. 위성에 탑재 가능하도록 제한된 크기의 반사판을 사용하고, 배열 소자의 개수를 최소화하면서도 요구 사항을 만족시킬 수 있는 설계 방법과 그 성능 결과를 본 논문에서 확인할 수 있을 것이다.

Abstract

This paper describes the study on the electrical design of a multi-beam large antenna for a satellite payload. This satellite antenna provides the universal communication and broadcasting services to personal portable terminals over the Korean Peninsula. The structure of the hybrid antenna fed by a feed array is proper to provide multi-beams. The amplitude and phase of each feed element should be optimized for a required beam and they can be obtained by GO (Geometrical Optics) and PO(Physical Optics) method. The number of feed elements are also optimized to meet the specification of EIRP(Effective Isotropically Radiated Power). The optimally designed antenna with the limited reflector size and minimum number of feed elements is shown in this paper.

Key words : Array-Fed, Cluster, Hybrid Antenna, Large Antenna, Multi-Beam

I. 서 론

최근, 개인 휴대 단말을 통한 보편적 통신 방송 서비스와 고속의 데이터 처리 속도에 대한 요구가 증가함에 따라 고이득의 대형 위성 탑재용 안테나의 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 대형 안테나에 다중 빔 시스템을 적용함으로써 안테나의 이득을 높일 뿐 아니라, 주파수 재사용 인자를 극적으로 향상시킬 수 있다. 이러한 사용자의 요구 사항을 만족

시키려면 20 m 이상급 반사판과 다수 개의 급전 소자를 적용한 하이브리드 안테나가 적절하다. 고이득을 갖는 대형 반사판과 상대적으로 작은 급전부로 구성된 하이브리드 안테나는 다중 빔이나 빔 조향 기능을 제공하기 때문에 위성 탑재용 안테나로 주로 사용된다. 실제 S-대역 안테나로, 2006년 일본에서는 13 m급 안테나를 탑재한 ETS-VIII을 발사하였고, 2008년 미국에서는 12 m급 안테나를 탑재한 ICO-G1을 발사하였다. 이외에도 미국, 일본, 유럽 국가들을 중

한국전자통신연구원 무선RF탑재기술연구팀(RF and Satellite Payload Research Team, ETRI)

· 논문 번호 : 20100716-092

· 교신저자 : 윤소현(e-mail : yunsh@etri.re.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 9월 17일

심으로 위성 탑재용 다중 빔 대형 안테나에 대한 연구 개발이 추진되고 있다^{[1]~[3]}.

하이브리드 안테나는 단일 급전 반사판과 같이 반사판을 최대한 사용하거나, 배열 급전의 소자들을 여기시켜 반사면의 일부분만 사용할 수도 있다. 단일 급전 반사판은 빔 폭의 10배 이상 되는 광범위 영역 빔 조향에는 어려움이 있다. 하지만 적절한 크기와 위상을 가진 급전 소자군(cluster)을 여기시키는 방법은 고이득 빔을 광범위하게 조향할 수 있다^[4]. 반사판 구조는 급전으로부터의 전파 방향을 없애기 위해 육섯 구조가 적절하다. 따라서 본 논문에서는 다중 빔 구현을 위해 배열 소자로 급전되는 단일 육섯 반사판의 구조를 설계하고, 전기적 해석을 통해 성능을 분석하고자 한다.

II. 다중 빔 안테나 설계

2-1 다중 빔 하이브리드 안테나 구조 설계

하이브리드 안테나를 설계하는 방법은 다양하게 존재할 수 있는데, 안테나 크기가 한 파장 이상이면 ray-path 또는 GO(Geometrical Optics) 방법이 유용하다^[5]. Ray-path 분석은 개발 초기 단계에서 제약 사항과 가능성에 대한 판단을 할 수 있다. 안테나가 수신 모드에 있을 때, ray군이 포물면 축 방향으로 평행하게 입사되면 ray군은 반사판을 거쳐 초점에 모일 것이다. 그런데 만약 ray군이 포물면 축에 대해 임의의 각도를 가지고 입사되면 ray군은 초점에서 벗어난 지역에 그림 1과 같이 형성된다^[6]. 그림 1에서 영역 2에 있는 교차 영역(crossover)의 필드는 각각의 각도를 가지고 진행되는 ray들에 의해 간섭 특성을 갖는다. 이 영역은 caustic 면과 반사판 모서리에서 오는 2개의 ray에 의해 정해진다. 빔 편향각이 커지면 교차 영역이 커져야 하고, 교차 영역은 초점에서 점점 멀어지게 된다. 혼과 같이 위상 중심을 갖는 단일 급전은 ray가 한 점(초점)으로 집중되었을 때 즉, 편향이 없는 경우에 대해서만 ray 형상을 얻을 수 있다. 단일 급전 ray의 대부분을 교차 영역으로 강제로 집중시키면 편향된 패턴을 얻을 수는 있다. 하지만 편향각이 빔 폭의 2~3배 이상이면 개구면에서의 위상 오차가 급격히 증가하여 이득과 부엽과 특성에 심각

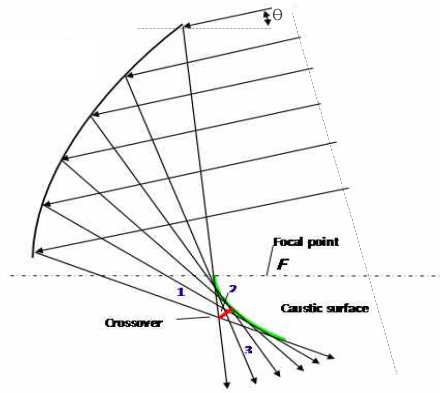


그림 1. 포물면 축과 임의의 각도(θ)로 입사
Fig. 1. Rays with deflection angle (θ).

한 영향을 준다. 이를 피하기 위해서는 급전 소자의 위상 중심을 한 점이 아닌, 확장 분포된 평면으로 취하면 된다. 확장 분포된 급전은 위상 배열 형태로 구현할 수 있고, 배열의 개구면에서 준-연속 필드 분포를 얻을 수 있다. GO 법칙에 따라, 편향된 각 빔에 해당되는 필드의 크기와 위상 분포를 계산할 수 있다^[7]. 교차 영역에서의 필드 분포는 요동하는 크기 함수와 급격히 변화는 위상 함수를 갖는다. 편향각이 커질수록 여기 영역은 위상 배열 개구면을 따라 이동하고 크기가 증가한다. 이와 같이 GO 방법을 통해, 반사판의 최적 구조(직경, 초점 거리, 육섯 길이)와 배열 소자의 최적 위치를 찾을 수 있다. 배열 소자 위치는 다음 조건에 따라 선택된다. 1) 각 빔은 최대 지향성을 가져야 하고, 2) 각 빔은 최적의 배열 소자 개수를 사용해서 형성되어야 하고, 3) 하나의 소자에 필요한 전력이 요구 사항을 만족해야 하며, 4) 각 빔에 필요한 배열 소자의 개수를 동일하게 구성하여, 빔 형성부를 간소화할 필요가 있다. 빔의 인접성 때문에 인접한 급전 소자군의 패턴은 서로 교차될 수밖에 없다. 따라서 하나의 배열 소자는 이웃한 2~3개의 빔을 동시에 만들어야 하기 때문에 특정 소자의 방사 전력은 급격히 증가될 수도 있다.

2-2 다중 빔 안테나 급전 소자군의 형상 설계

위성에 탑재하기 위해 반사판의 크기는 제한되기 때문에 반사판의 경사진 단면의 크기를 30 m로 하는 육섯 포물면 반사판을 설계 조건으로 한다. 하이

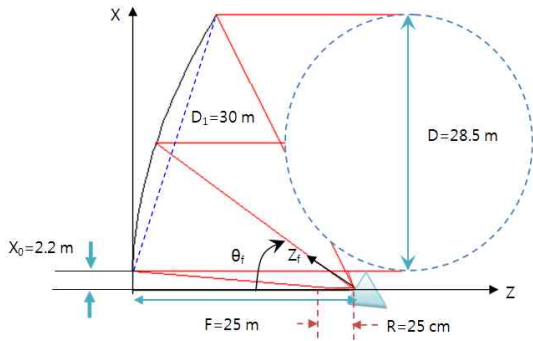


그림 2. 오프셋 반사판 구조 설계 파라미터
Fig. 2. Design parameters of a offset parabolic reflector.

브리드 반사판의 구조는 그림 2와 같고, 각 파라미터는 1) 초점과 개구면 크기 비(F/D), 2) 반사판 초점과 급전 소자군의 상대적인 위치(R), 3) 초점 축에 대한 배열 소자의 경사각도(θ_f), 4) 서비스 영역 중심의 좌표계, 5) 안테나의 개구면 필드 분포에 의해 결정된다. 최종 설계 조정 단계에서 안테나가 요구 사항을 만족하는지 판별하고 필요에 따라 주변 급전 소자를 추가하거나 제거할 수도 있다^[8].

하이브리드 안테나를 위한 급전 배열은 적절한 신호 크기와 위상 분포를 가져야 한다. 배열 소자는 물리적으로 이산적 배치를 갖고 있기 때문에 요구되는 필드는 이산 오차를 포함하고 있다. 배열 소자의 간격이 좁을수록 이산 오차를 줄일 수는 있지만 각 급전 소자군에 필요한 부품이 차지하는 물리적인 공간 때문에 한계가 있다. 실제로, 배열 소자의 간격은 $0.5 \sim 0.7 \lambda$ 이상이 되도록 선택한다. 또한, 반사판 전체에 효율적으로 필드를 여기시키기 위해 배열 소자의 빔 패턴은 충분히 넓게 설계해야 한다. 즉, 반사판의 edge taper가 1.5~2 dB 수준이 바람직할 것이다^[9]. 배열 소자의 크기를 결정하는 다른 중요 파라미터는 EIRP(Effective Isotropically Radiated Power)와 소자의 한계 전력이다. 배열의 크기가 작아지면 개별 소자에 필요한 전력이 증가하기 때문에 EIRP는 배열의 최소 크기를 결정한다. 고품질 통신 및 방송 서비스를 제공하기 위해 안테나에 필요한 성능 요구 사항인 EIRP는 68.5 dBW 이상이 되도록 한다. 또한, 현재 기술로 구현 가능한 S-대역 위성 탑재용 SSPA(Solid State Power Amplifier)를 이용하기 위해 각 소자의 최대 방사 전력은 35 W 미만이 되도록 한다.

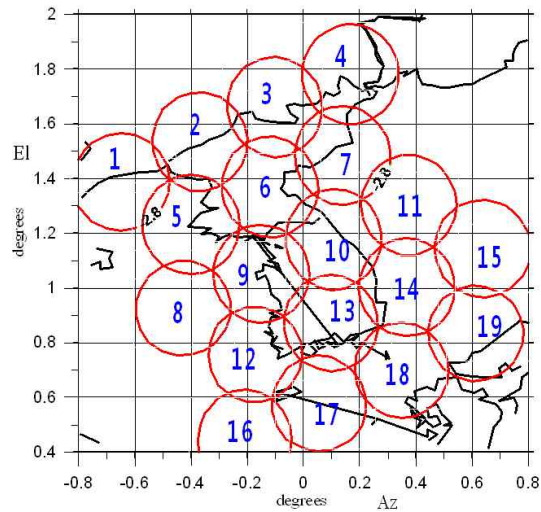


그림 3. 빔 커버리지 요구 사항
Fig. 3. Requirement of beam coverage.

서비스 커버리지 요구 사항은 그림 3과 같이 19개의 다중 빔으로 구성하고, 이때 정지 궤도 위성은 128°E에 위치시킨다.

필드 해석과 빔 구현을 위한 급전 소자군의 형성은 2단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 GO 방법을 사용하고, 두 번째 단계에서는 PO(Physical Optics) 기법을 사용한다. 첫 단계인 GO 기법을 사용하여 ray-path 필드에 따라 배열 소자의 크기와 위치를 정의할 수 있다. GO-ray가 반사판에 부딪히면 반사 법칙에 의해 ray-path 필드는 배열 개구면의 특정 지역과 교차하게 된다. 하지만, 배열 급전은 ray-path 필드의 교차 영역 내에 어디든지 위치할 수 있기 때문에 급전 배열의 위치를 결정하기는 쉽지 않다. 배열 평면에서 교차되는 ray 영역에 있는 급전 소자군은 그림 4와 같다. 그림 4의 평면에 위치한 점들은 급전 소자의 위치를 나타낸 것이고, 초점으로부터 배열 급전 사이 거리가 축 방향(Z-axis)으로 0.7 m인 경우와 0.3 m인 경우를 비교하였다. (+) 편향 각도가 커지면 급전 소자군은 아래로 내려가면서 수평 방향으로 넓어지고, (-) 편향 각도가 커지면 급전 소자군은 위로 올라가면서 수직 방향으로 길어진다. 예를 들어 $EI = -0.6^\circ$ 이고 $R = 0.7$ m인 경우, ray는 21개 급전 소자에 관여되고 인접 소자까지 포함한다면 43개 소자가 필요하다. 급전 소자군이 작을수록 하나의 소자에 필요한 파워는 커져야 하지만, 중첩 영역

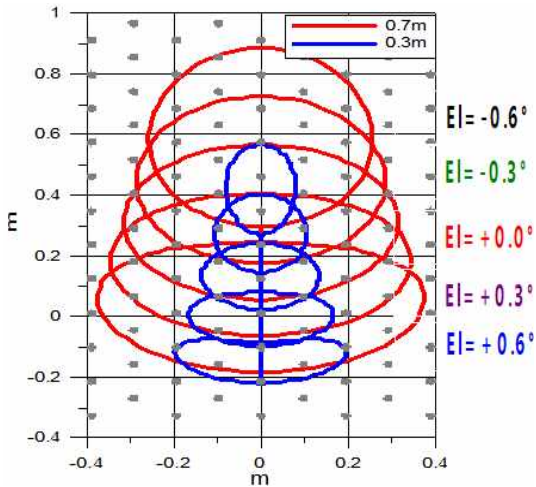


그림 4. Ray군에 의한 급전 소자 위치
 Fig. 4. GO-bundles on array plane according to array location.

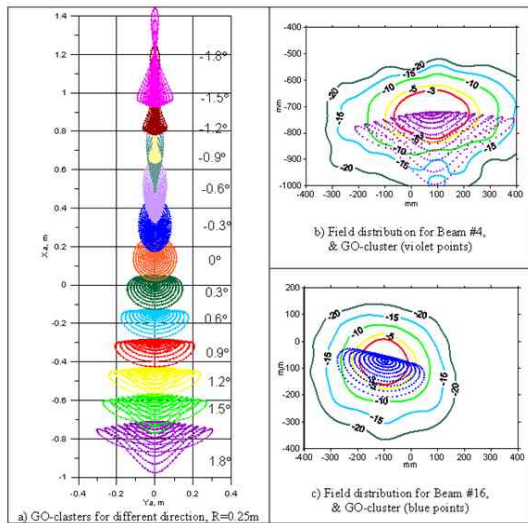


그림 5. 설계된 안테나의 Ray군 (a) 편향각에 따른 GO 해석 결과, (b) 4번 빔 해석 결과(점선-GO 결과, 직선-필드 분포), (c) 16번 빔 해석 결과(점선-GO 결과, 직선-필드 분포)
 Fig. 5. GO-bundles of designed antenna.

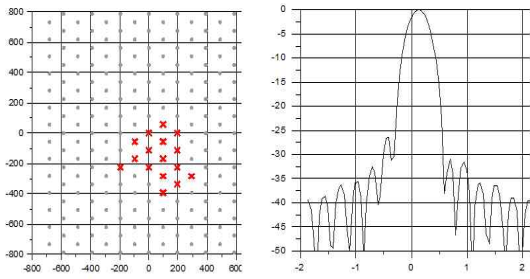
은 작아지게 되어 각 소자가 관여해야 하는 빔의 수를 줄일 수 있다. 배열의 위치와 기울기를 변화시켜 가면서 최적의 급전 소자군 형상을 찾는다. 다양한 해석을 통해 얻은 최적의 안테나 구조 파라미터는 그림 2에 나타난 것과 같이 $D=28.5\text{ m}$, $F=25\text{ m}$, $X_0=2.2\text{ m}$, $R=25\text{ cm}$ 이고, 설계된 안테나 구조의 편향각

도에 따른 GO 해석 결과는 그림 5(a)에 나타내었다. 이 때 설계 주파수는 2 GHz이다. 그림 3에서 볼 때, 가장 큰 편향각을 갖는 빔은 4번과 16번이기 때문에 그림 5(a)에서 두 빔에 해당되는 결과를 그림 5(b)와 그림 5(c)에 좀 더 자세히 나타내었다. 이러한 GO 해석을 통해 각 빔에 필요한 소자를 선택하고, 배열의 크기를 결정할 수 있다.

2-3 급전 소자군의 여기계수 설계

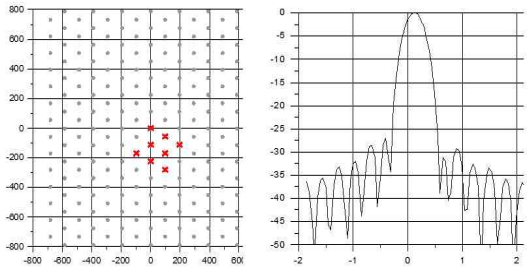
두 번째 PO 단계에서는, 해당 교차 지역에 있는 배열 소자의 신호를 적절한 크기와 위상으로 합성하여 안테나가 요구하는 빔을 생성한다. 수신 모드 GO 해석을 통해 배열 평면 내의 필드 크기(b_k) 및 위상 분포(φ_k)를 안다면, 배열 내에 있는 각 소자에 적절한 크기(b_k)와 위상($-\varphi_k$)을 여기시킬 수 있다. 요구 빔은 각 급전 소자군에 의한 안테나 패턴을 송신 모드에서 해석함으로써 구성할 수 있다. 급전 소자군 내 k -번째 소자에 의해 여기되는 안테나의 개별 패턴을 $f_k(\alpha, \beta)$ 라 할 때, 급전 소자군에 의한 안테나 패턴 $F(\alpha, \beta)$ 의 크기는 개별 패턴의 합으로 구해진다. 이때, α 는 고각, β 는 양각 방향을 나타낸다. 안테나 패턴의 크기 레벨은 급전 소자군을 구성하는데 있어 기준이 되는데, 본 논문에서는 이를 한계 수준(boundary level)이라 부를 것이다. 한계 수준이 낮을수록 안테나의 개구 효율은 좋아지나, 급전 소자군을 구성하는 소자의 개수는 증가하게 된다. 한계 수준이 -15 dB 이하라면 빔 편향 각도에 따른 안테나 개구 효율은 약 70 % 수준으로 일정해진다. 만약 빔의 최대 편향 각도가 1.8° 이고 한계 수준이 -25 dB 이면, 급전 소자는 총 80개가 필요하게 된다.

급전 소자 개수를 결정하는 데 있어 또 다른 기준이 되는 것은 급전 소자군에 필요한 소자 개수를 동일하게 하는 것이다. 예를 들면, GO 해석에 의해 얻어진 급전 소자군 중에서 최대 크기를 갖는 16개의 소자를 선택하고, 각 소자에 적절한 크기와 위상을 여기시켜 PO 해석을 통해 패턴을 계산한다. 결과 패턴의 부엽과 특성에 따라, 16개 소자 중 몇 개를 제거하거나, 낮은 신호 크기를 갖는 주변의 다른 소자들로 대체 또는 추가하여 성능이 향상되는지 분석해야 한다. 그림 6은 16개 소자를 사용하여 급전 소



(a) 사용된 급전 소자 (b) 안테나 성능 패턴
 (a) 16 elements for beam#7 (b) Antenna radiation pattern for beam#7 with 16 elements

그림 6. 16개 소자 갖는 7번 빔 패턴
 Fig. 6. Pattern of beam#7 with 16 elements.



(a) 사용된 급전 소자 (b) 안테나 성능 패턴
 (a) 8 elements for beam#7 (b) Antenna radiation pattern for beam#7 with 8 elements

그림 7. 8개 소자 갖는 7번 빔 패턴
 Fig. 7. Pattern of beam#7 with 8 elements.

자군을 구성한 것이다. 급전 배열의 개구면을 2차 평면(X-Y)으로 나타내면 그림 6(a)에서와 같이 배열 평면에 위치한 소자들을 나타낼 수 있고, 전체 소자들 중 선택된 16개는 붉은색(x)으로 구분하였다. 이때 배열 평면의 단위는 mm이고, 배열 소자 간 간격은 약 100 mm이다. 선택된 16개의 급전 소자에 의해 여기된 안테나의 방사 패턴은 그림 6(b)에 나타내었다. 그림 7은 8개 소자를 사용하여 급전 소자군을 구성한 것이다. 그림 6과 그림 7의 패턴은 7번 빔에 대한 결과로, 급전 소자 개수를 줄여 부엽과 특성을 향상시켰다. 이때, 소자 개수를 감소시키면 효율이 감소하여 이득이 저하되므로 주의해야 한다. 그림 6은 52.5 dB 이득을 갖는 반면, 그림 7은 52.5 dB를 갖는다. 각 빔은 서로 다른 편향각을 갖고 있기 때문에, 빔마다 개구 효율과 이득도 상이하다. 적절한 급전

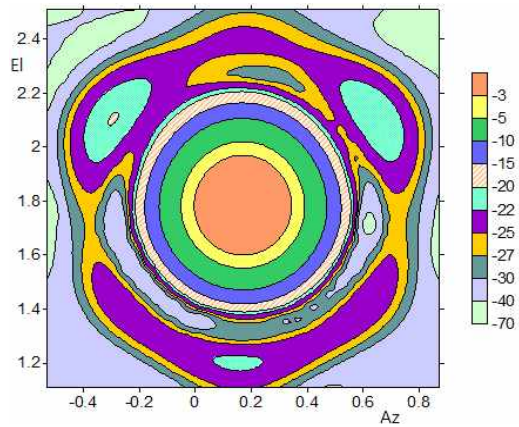


그림 8. 32개 소자를 갖는 4번 빔 패턴
 Fig. 8. Beam#4 pattern with 32 elements.

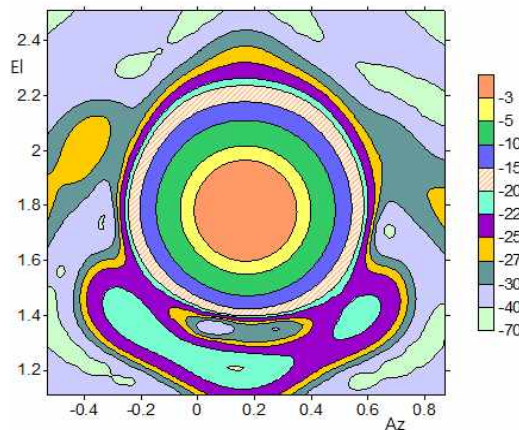


그림 9. 16개 소자를 갖는 4번 빔 패턴
 Fig. 9. Beam#4 pattern with 16 elements.

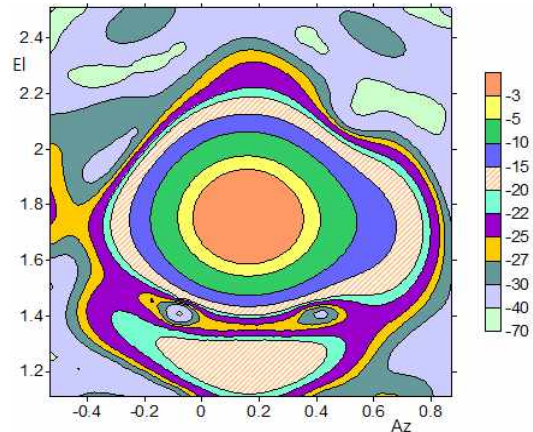


그림 10. 8개 소자를 갖는 4번 빔 패턴
 Fig. 10. Beam#4 pattern with 8 elements.

소자의 개수를 결정하기 위해, 가장 큰 편향각을 갖는 4번 빔에 대한 패턴 해석을 수행하였다. 급전 소자의 개수가 32개, 16개, 8개일 때, 4번 빔의 패턴을 방위각(Az)과 양각(EI) 좌표축에 대해 그림 8~10에 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 32개 소자를 사용한 경우 가장 우수한 성능을 보이고, 8개 소자를 사용한 경우는 빔이 변형되어 성능 열화가 있음을 알 수 있다. 따라서 소자 개수를 최소화하면서도 성능 열화를 줄일 수 있도록 소자 개수를 16개로 선택한다.

요구 사항에 제시된 19개의 빔을 형성하기 위해 80개의 급전 소자를 사용하고, 각 급전 소자군은 16개 소자로 구성되는 하이브리드 안테나를 설계하였다. 설계된 급전 소자의 형상을 그림 11에 나타내었다. 각 급전 소자군을 위해 선택된 소자의 위치를 확인할 수 있다. 배열 평면의 중앙에 위치한 소자들은 최대 8개 소자군에 동시에 사용되기 때문에 전력은 그림 12와 같이 중앙에 집중된다. 배열의 중심 부근에 위치한 소자의 최대 전력은 33.6 W로 요구 사항을 만족한다. 최대 전력 요구 사항을 만족시키기 위해서는 소자의 개수를 100개 이상으로 늘려야 한다. 급전 소자의 개수는 추후, 안테나 시스템 차원에서 전기적 성능과 기계적 성능의 적절한 trade-off를 통해 조절될 수 있을 것이다. 80개 소자로 구성된 하이브리드 안테나 빔 위치에 따라 53.9~54.1 dB의 최대 이득을 가진다. 최대 이득에 비해 2.8 dB taper를 갖는 빔 형상을 그림 13에 나타내었다. 이는 안테나의 전기적 요구 성능인 그림 3을 만족한다.

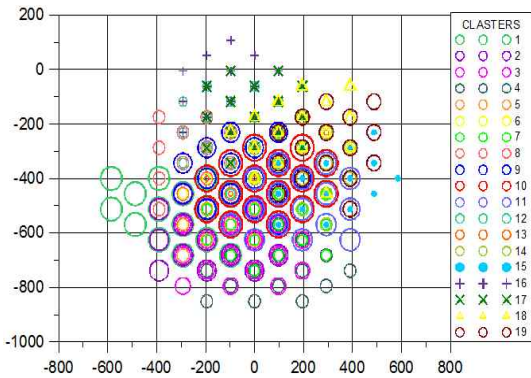


그림 11. 19개 빔 형성을 위한 80개 급전 소자 구성
Fig. 11. 80 feed elements to form 19 beams.

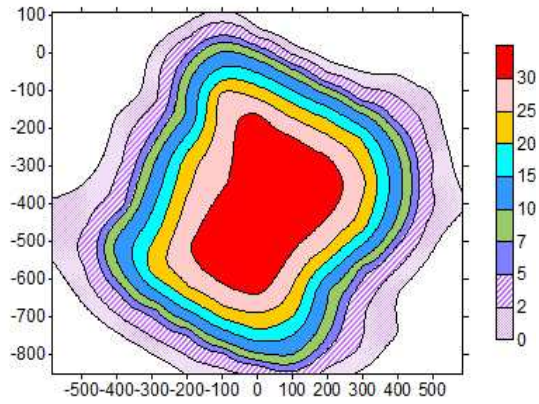


그림 12. 배열 급전 소자의 전력 분포
Fig. 12. Power distribution over feed array.

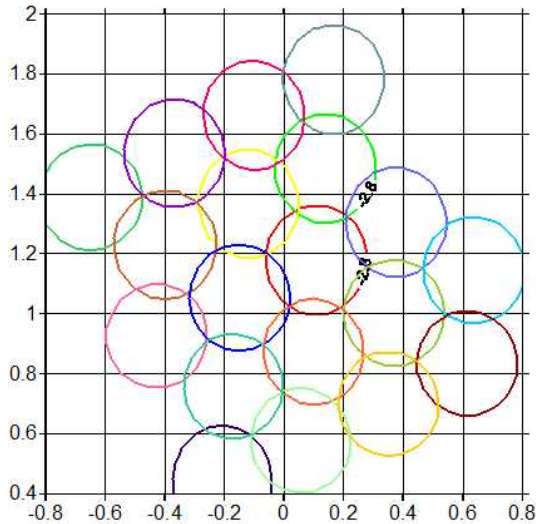


그림 13. 다중 빔 안테나 빔 contour
Fig. 13. 2.8 dB multi-beam contour.

III. 결 론

개인 휴대 단말 통신을 위해 위성 탑재용 안테나를 대형화하고 다중 빔 구현을 통해 주파수를 효율적으로 사용하고자 하는 요구가 대두되고 있다. 이를 위해 30 m급 반사판과 급전 배열 소자를 사용한 하이브리드 반사판 안테나를 설계하였다. 각 빔은 위치에 따라 상이한 편향각을 가지며, 이는 각 빔에 필요한 급전 소자를 선택하는 기준이 된다. GO 및 PO 해석을 통해 반사판 구조와 급전 배열 개수 및 크기를 최적화하고, 각 급전 소자의 신호 크기와 위상도 최적 설계하였다. 본 논문에서 제시한 하이브리드

리드 안테나 설계 방법은 다중 빔 구현 방법 및 성능 결과를 제시해 준다. 향후, 이를 토대로 시스템 요구 사항을 분석하고, 전기적 성능뿐 아니라 기계적 성능을 모두 만족하는 위성에 탑재 가능한 다중 빔 대형 안테나를 구현할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 윤소현, 엄만석, 염인복, 안도섭, "그물망 반사관 안테나의 전기적 성능에 관한 연구", 한국통신학회 동계종합학술대회, 2010년.
 [2] Ken-ichi Haryu, Yasuhiko Yamasa, Teruki Okamoto, Yuichi Otsu, Kazuhiko Yoneyama, and B. B. Mandelbrot, "Development of antenna system for S-band mobile satellite communications and broadcasting", *IEEE 46th Vehicular Technology*, 1996.
 [3] Gunnar Tibert, "Deployable tensegrity structures for space applications", *Technology Reports from Royal Institute of Technology*, Apr. 2002.
 [4] John Litva, Titus Kwok-Yeung Lo, *Digital Beam Forming in Wireless Communications*, Artech Hou-

se, Boston · London, 1996.
 [5] L. I. Alimova, B. E. Kinber, V. I. Klassen, and A. V. Shishlov, "Asymptotic theory of hybrid antenna", *Collected Guidance Articles Devoted to Applied Electrodynamics*, issue. 6, pp. 258-290, 1983.
 [6] Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, 2nd Edition, Artech House, Boston · London, 2005.
 [7] A. V. Mrstik, R. G. Smith, "Scanning capabilities of large parabolic cylinder reflector with phased array feed", *IEEE Trans. on AP*, vol. 29, no. 5, pp. 455-465, 1981.
 [8] A. W. Rudge, K. Milne, A. D. Oliver, and P. Knight, *The Handbook of Antenna Design*, Perter Peregrinus Ltd., London, UK, vol. 1-2, pp. 415-505, 1986.
 [9] Suhakar K. Rao, "Design and analysis of multiple beam reflector antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 53-59, Aug. 1999.

윤 소 현



1998년: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년~현재: 한국전자통신연구원 무선RF탐재기술연구팀 선임연구원

[주 관심분야] 위성 탑재용 안테나, 위성 추적 안테나, 안테나 급전 소자, 수동소자 개발

엄 만 석



1987년: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
 2007년: 중앙대학교 전자공학과 (공학박사)
 1992년~현재: 한국전자통신연구원 무선 RF탐재기술연구팀 책임연구원

[주 관심분야] 위성 시스템, 위성 탑재체, 능동소자, MMIC, 수동소자, 안테나 개발

염 인 복



1990년: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

2004년: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)

2007년: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)

1990년~현재: 한국전자통신연구원

무선RF탑재기술연구팀 팀장

[주 관심분야] 위성시스템, 위성 탑재체, 능동소자, MMIC, 수동소자, 안테나 개발