

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(10), 904-910(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.10.904

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

다중 빔 안테나를 이용한 한반도지형에서의 국소 지역 재밍 신호 제거 연구

정치현*, 서종우**

High resolution nulling limitations for a multi-beam antenna
: A Case Study for Korean Peninsula

Chi-Hyun Cheong* and Jong-Woo Seo**

HANWHA THALES Co.*, Agency for Defense Development**

ABSTRACT

The choice of nulling antenna type to be used for a given specification of user locations usually centers on whether to use a phased array antenna(PAA) or a multiple-beam antenna(MBA) for a satellite payload. This paper considers a MBA to analysis the nulling effect in the Korean peninsula jamming circumstance. First, the nulling performance and characteristics on the region of the earth coverage are confirmed with respect to the case of 7 beams. Then, optimum results are derived and compared to what can be accomplished with a fixed set of beams(the case of 10 and 19 beams are considered) for null steering to reject interference is investigated for a MBA.

초 록

일반적으로 위성에 탑재되어 재밍 신호 제거를 위해 널링 기능을 수행하는 안테나로 위상배열 안테나 또는 다중 빔 안테나를 사용한다. 본 논문에서는 다중 빔 안테나를 사용하여 한반도 지형에서의 널링 효과에 대하여 고찰하였다. 먼저 7개의 다중 빔으로 지구 전체를 커버하는 경우에 대하여 널링 성능과 그 특성을 확인하였으며, 다음으로 10개 및 19개의 다중 빔을 한반도에 적용하여 최적의 결과를 도출 및 비교하였다.

Key Words : Multi-beam Antenna(멀티 빔 안테나), Nulling(널링), Jamming(재밍)

1. 서 론

높은 통신효율을 우선적으로 고려하여 개발되는 상용 위성과는 달리 군 위성통신망은 재밍, 물리적인 공격, 신호의 감지 및 감청 등과 같은 적의 위협으로부터 "생존성"을 보장할 수 있는 통신 수단을 제공해야 하며, 이는 군 위성통신체

계에 전략적 가치를 부여하는 핵심기능이다[1].

특히 의도적으로 지상에서 위성으로 위성신호와 동일한 대역으로 송출된 간섭 신호로 인해 위성의 수신 기능을 저하시키거나 수신기를 포화시켜 그 기능을 마비시키는 등의 재밍(jamming) 공격이 있을 수 있다. 이러한 재밍의 발생은 우주부 뿐만 아니라 지상에서도 최근 GPS 신호의

† Received : April 28, 2016 Revised : September 8, 2016 Accepted : September 21, 2016

* Corresponding author, E-mail : chihyun.cheong@hanwha.com

수신을 방해하는 재머가 휴전선 부근에서 발생하여 GPS 수신에 방해가 받아 사용자의 불편을 초래하기도 하였다. 따라서 안정적인 통신환경을 통한 작전운용을 위해 재머에 의한 간섭을 제거하는 기술은 대단히 중요하다고 할 수 있다.

이러한 재머 제거 기술에 대해서 많은 연구가 이루어져 왔으며, 그 중 사용자 신호와 재머 신호간의 공간적 분리 특성을 이용하여 재머에 대한 영향을 줄이는 것을 목적으로 하는 널링(nulling) 안테나에 대한 연구가 수행되고 있다[2]. 미국과 유럽에서 발사된 MILSTAR II, AEHF(미국)과 Syracuse III(프랑스), Skynet 5(영국) 등은 모두 위성에 수신된 간섭 제거를 목적으로 이러한 안테나를 탑재하여 운용중에 있다. 또한 상용 이동통신 시스템에서도 외부의 방해신호의 영향을 감소시키기 위한 널링 안테나의 일종인 스마트 안테나에 대한 연구가 이루어지고 있다[1][3].

널링 안테나 시스템에 있어서 널링 알고리즘은 Applebaum-Howells 형태의 적응 안테나 시스템이 발표된 이래 많은 연구가 이루어져 왔으며, 기본적으로 수신 신호의 공분산(covariance) 행렬 또는 자기상관(autocorrelation) 행렬을 이용하는 방법을 주로 이용한다. 널링을 위해 위의 행렬 자체를 사용하거나 혹은 행렬의 고유치 혹은 고유벡터를 이용하는 방법 등이 있으며 이러한 행렬을 구하기 위한 수신 회로의 대역 특성 및 안테나 특성 등에 의한 널링 알고리즘의 대역 특성의 분석 및 다양한 간섭 신호의 수신 환경에 대한 내성 향상 등에 활용되고 있다[4].

배열 안테나를 이용하여 널링 안테나를 구성할 경우, 각각의 배열 소자마다 수신기를 필요로 하므로 비용 증가 및 하드웨어의 복잡도도 증가된다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 random search, steepest descent 나 유전자(genetic) 알고리즘 등이 제안 되었으나 널링 수행 속도가 비교적 느리며, 특히 주빔(main beam) 근처로 재머가 들어올 경우, 주빔의 위치가 이동하여 통신 영역의 위치가 변경되는 구조적 문제는 벗어나지 못한다[5][6]. 이는 일정한 통신 서비스를 목적으로 하는 통신 위성에서는 큰 단점이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 널링 기능을 수행하는 위성 탑재용 안테나를 배열 안테나에 비해 전기적 구조가 간단하고 안정된 통신 서비스 영역을 보장하는 다중 빔 안테나로 선정하여 그에 따른 널링 알고리즘을 도출하고 그 성능을 분석하였다. 먼저 반사판을 가지는 파라볼라 안테나 형태

또는 렌즈 안테나 형태를 가정하여 널링 알고리즘을 분석하였으며, 이를 바탕으로 지구 전체를 커버하는 경우에 대하여 성능과 특성을 분석하였다. 마지막으로 다중 빔 안테나의 한반도 적용 결과를 시뮬레이션하기 위해 널링 알고리즘을 통한 정상정인(steady state) 널링 성능을 도출하는데 주안을 두고, 물리적으로 구현이 가능한 안테나 구조 범위 내에서 통신 서비스 영역, 재머의 억압 능력 등에 대하여 분석하였다[7].

II. 본 론

2.1 널링 알고리즘

다중 빔 안테나 시스템에 사용되는 안테나로는 반사판을 가지는 파라볼라 안테나 형태 또는 렌즈 안테나 형태를 가정한다. 이러한 안테나의 개구면에 분포하는 전계 분포를 $F(x',y')$ 이라 하면 이로 인한 원거리 전장은 다음과 같이 개구면 분포의 푸리에 변환의 형태를 나타낼 수 있다[8].

$$E(\theta, \phi) = \iint_{A'} F(x', y') e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dx' dy' \quad (1)$$

여기에서 A' 은 $z'=0$ 인 $x'y'$ 평면에 위치한 개구면의 면적을 나타내며 k_x 와 k_y 는 각 침자 방향에 대한 전파 상수를 의미한다. 반사판 혹은 렌즈 안테나의 개구면을 지름이 D 인 원형으로 가정하고 $k_x x'$ 은 ux 로 $k_y y'$ 은 vy 로 좌표계 변환을 하면 아래와 같다[9].

$$u = \frac{k_0 D}{2} \sin\theta \cos\phi, \quad v = \frac{k_0 D}{2} \sin\theta \sin\phi$$

$$x^2 + y^2 \leq 1, \quad u^2 + v^2 \leq \left(\frac{k_0 D}{2}\right)^2 \sin^2\theta = \frac{4\pi A'}{\lambda^2}$$

이러한 개구면 분포에 한정된 복사 패턴을 원하는 복사 패턴(E_s)에 근사 시키도록 하기 위해서는 적절한 기저함수를 선택하여야 하며 이를 통하여 다음과 같이 원하는 복사 패턴과의 최소 오차를 가지는 기저 함수의 크기를 구해야 한다.

$$\Delta\epsilon = \iint_{u^2+v^2 \leq \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2} |E_s - E|^2 dudv \quad (2)$$

원형 개구면을 비추는 여러 개의 피딩 안테나로부터 전체 안테나 시스템이 커버하는 영역에서 개개의 피딩 안테나가 지향하는 방향을 최대의 분포 효율을 얻기 위해 별집 구조로 Fig. 1과 같이 정렬하면 각각의 지향 방향을 위한 개구면 분포는 주기적인 구조에서의 플로케 모드 이론

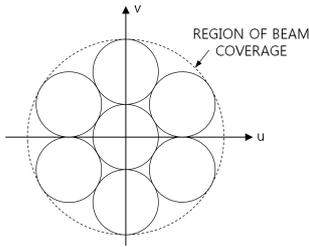


Fig. 1. Hexagonal beam positioning

(Floquet's theory)를 이용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(x,y) = \sum_n \sum_m B_{n,m} e^{ju_n x} e^{jv_{n,m} y} \quad (3)$$

여기에서 $B_{n,m}$ 은 각 지향 방향에 대한 크기이며 각 빔의 중심에 해당하는 u_n 과 $v_{n,m}$ 은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} u_n &= \alpha n \pi \\ v_{n,m} &= \alpha \frac{\pi}{\sqrt{3}} (2m - n) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 α 는 빔간의 간격을 조절하는 변수이며, 위 식으로 주어지는 n , m 번째 빔의 지향 방향은 다음과 같다[10].

$$\begin{aligned} \theta_{n,m} &= \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{\pi D} \alpha \sqrt{u_n^2 + v_{n,m}^2} \right) \\ \phi_{n,m} &= \tan^{-1} \left(\frac{v_{n,m}}{u_n} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (3)을 $B_{(n,m)}$ 에 관한 식으로 변환하면 개구면에 대한 푸리에 변환의 형태가 되고, 이것을 식 (1)에 대입하여 정리하면 아래와 같다.

$$E(u,v) = \sum_n \sum_m E(-u_n, -v_{n,m}) \phi_{n,m}(u,v) \quad (6)$$

위 식에서 $\phi_{n,m}$ 은 개구면에 걸쳐 크기가 일정하고 위상 분포가 플로케 모드로 주어지는 전체 분포에 대한 푸리에 변환이며 다음과 같다.

$$\phi_{nm}(u,v) = \frac{2J_1(\sqrt{(u-u_n)^2 + (v-v_{n,m})^2})}{\sqrt{(u-u_n)^2 + (v-v_{n,m})^2}} \quad (7)$$

여기에서 J_1 은 1차 베셀 함수를 의미하며, 이로 인한 빔의 근사표현은 Fig. 2와 같다.

다중 빔 시스템에서 널링 구현을 위한 비용함수를 구하기 위해, 식 (6)의 각 지향빔의 크기를

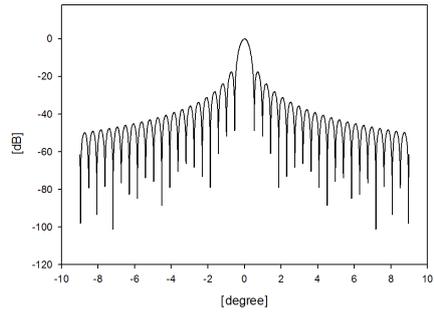


Fig. 2. Beam radiated from a circular aperture of diameter $D=130\lambda$, normalized to unity at the beam maximum

나타내는 $E(-u_n, -v_{n,m})$ 을 $A_{n,m}$ 으로 변환하고, 식 (2)로 주어지는 원하는 복사 패턴과의 최소 오차 관계식을 적용하여 재밍 신호가 존재하는 방향에 대한 널링 조건을 부과하면 식 (8)과 같은 비용함수를 만들 수 있다.

$$f(A_{n,m}) = \iint_{-\infty}^{\infty} [E_s(u,v) - \sum_n \sum_m A_{n,m} \phi_{n,m}(u,v)]^2 dudv \quad (8) + \sum_{l=1}^L \gamma_l \sum_n \sum_m A_{n,m} \phi_{n,m}(u_l, v_l)$$

$\gamma_l (l=1, \dots, L)$ 은 재머 개수를 나타내며 u_l 및 v_l 은 재밍 신호의 방향이다. 식 (8)의 첫 번째 항은 재밍 신호가 존재하지 않을 경우의 다중 빔 안테나에 의한 복사 패턴을 결정하며, 원하는 신호에 대한 식별 방법이 존재하지 않는 일반적인 경우를 가정할 때, 다중 빔 안테나가 커버하는 영역에 대한 동일한 이득을 가지도록 해야 하므로 다음과 같이 E_s 를 표현할 수 있다.

$$E_s(u,v) = \begin{cases} 1, & \text{for desired area} \\ 0, & \text{else where} \end{cases} \quad (9)$$

또한 식 (8)의 미지수 $A_{n,m}$ 과 γ_l 를 구하기 위하여 다중 빔 영역 내에서 각각의 빔은 동일한 이득을 갖도록 하며, 재밍 신호의 방향에 대한 널링 조건을 만족하도록 하기 위해서는 아래 수식을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial A_{n,m}} &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \gamma_l} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 위 수식을 바탕으로 다중 빔 시스템에서 재밍 신호 방향에 대한 널링을 구현하기 위하여 각 빔의 크기가 어떻게 변화되는지를 계산할 수 있다.

2.2 널링 특성 분석

널링 알고리즘의 특성 분석으로 인한 최적화

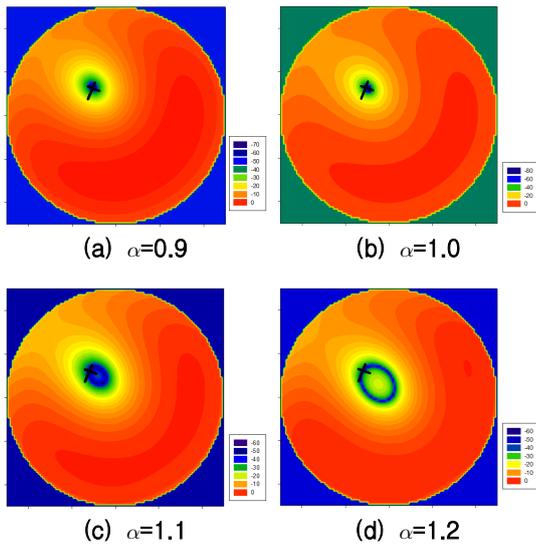


Fig. 3. Earth-coverage nulling pattern (one jamming)

를 위해 위성 탑재 안테나가 적도에 위치하고 있으며[11], Fig. 1과 같이 7개의 다중 빔으로 지구 전체를 커버하고 있다고 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

먼저 1개의 재머를 가정하여 분석하였다. 사용된 시뮬레이션 파라미터는 $D=10.7\lambda$ 이며 $\theta=3^\circ$, $\phi=128^\circ$ 에 간섭 신호가 있는 경우를 가정하여 α 의 변화에 따른 널링 복사 패턴을 도시하였다. α 는 식 (4)에서와 같이 반사판 개구면의 전계 분포를 이루는 플로케 모드를 구성하는 인자로 다중 빔 안테나를 구성하는 개별 빔간의 위치(간격)를 결정한다.

Figure 3에서 x는 재밍 신호가 있을 것으로 가정된 위치를 나타낸다. 재머의 영향으로 인해 최고 이득을 갖는 면적, 즉 통신 영역이 줄어들게 되지만 α 의 값이 작을수록 간섭 신호에 관계되는 각 빔의 영향이 그만큼 커지기 때문에 상대적으로 통신 영역이 더 넓어지고, 널의 크기도 더 깊게 형성됨을 알 수 있다. Fig. 3의 각각의 경우에 대하여 각 빔의 위치와 반치각(half power beam width)을 도시하면 Fig. 4와 같다.

α 의 값이 1인 경우에 외곽에 위치하는 빔의 반치각이 커버리지의 경계와 만나는 지점임을 알 수 있으며, 이를 기준으로 빔의 간격이 더 좁아지는 경우 Fig. 3과 같은 결론을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 널의 크기를 더 깊게 만들기 위해 빔의 간격을 좁게 만든다는 것은 실제로 안테나를 구현함에 있어서 피딩 안테나간의 간격이 좁아져야 한다는 것을 의미하며 이는 물

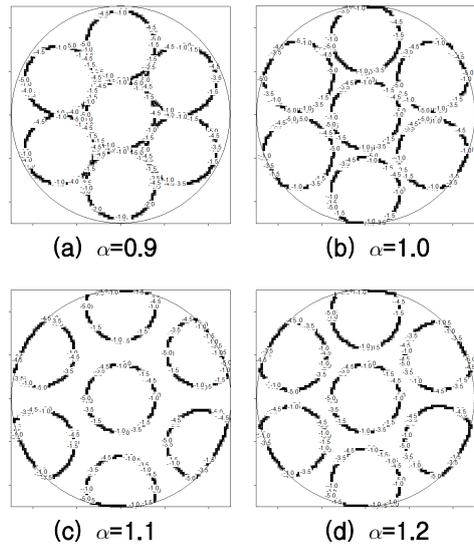


Fig. 4. Beam-positioning of earth-coverage

리적으로 구현하는 것이 불가능 하거나 급전혼간의 커플링으로 인한 원치 않는 간섭현상의 발생 가능성을 고려해야 할 것이다. 이로 인해 멀티빔 시스템에서의 안테나 설계는 이웃하는 세개의 안테나패턴이 만나는 점이 최대이득보다 -3 ~ -4dB 떨어지는 곳으로 빔을 위치하도록 하고 있다[12].

또한 재밍 신호가 없는 경우, 통신 위성의 본 목적인 안정적인 통신 영역을 보장하기 위하여 다중 빔 안테나 시스템의 복사 영역 내에서 동일한 이득 특성 또한 고려해야한다. 이에 대한 패턴은 Fig. 5와 같다. 0.3의 α 변화에 대하여 전체 복사 영역 내에서 약 1dB의 이득 평탄도 차이가 나며 빔간의 간격이 넓어지는 경우 널 형성 능력과는 달리 평탄도 측면에서는 오히려 더 우수한 특성을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 개별 빔간의 간격은 이득 평탄도와 널의 깊이간의 Trade-off 관계에 있으므로 다중 빔 안테나 구현시, 중요한 설계 파라미터로 활용해야 한다.

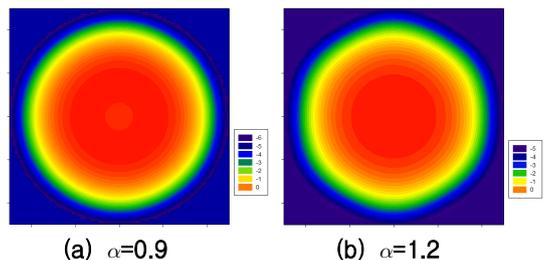


Fig. 5. Earth-coverage Radiation pattern

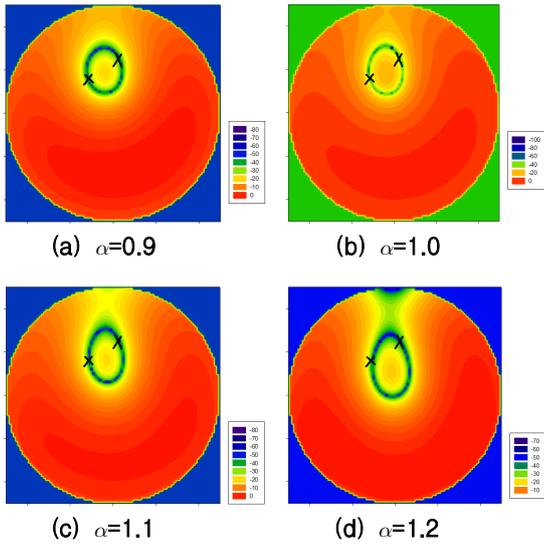


Fig. 6. Earth-coverage nulling pattern (two jamming)

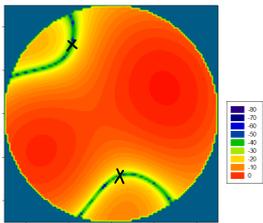


Fig. 7. Earth-coverage nulling pattern (two jamming)

다음으로 $D=10.7\lambda$ 이며 $\theta=3^\circ$, $\phi=128^\circ$ 및 $\theta=4^\circ$, $\phi=80^\circ$ 에 2개의 재밍 신호가 있는 경우에 α 의 변화에 따른 널링 빔 복사 패턴의 변화를 시뮬레이션 하였다. 재밍 신호가 하나 이상인 경우 Fig. 6에서와 같이 빔 간격과 무관하게 널링 지점을 포함하는 띠를 형성한다. 이는 개구면이 유한하기 때문에 생기는 제약으로 일정한 부엽을 갖는 각각의 빔간 상호작용을 하게 된다. 식 (8)의 첫째 항에서와 같이 커버리지내에 일정한 이득을 가져야하는 제한으로 인해 식 (8)의 둘째 항으로 정의되는 널링 빔이 널링 지점이 아닌 그 근처에서 최대값을 갖게 되어 띠를 형성하게 된다. 따라서 다중 재머에 의한 널링의 경우 널링 지점간의 거리가 주엽에서 첫 번째 부엽까지의 거리이상으로 떨어지면 Fig. 7($D=10.7\lambda$ 이며 $\theta=6^\circ$, $\phi=128^\circ$ 및 $\theta=5^\circ$, $\phi=-80^\circ$, $\alpha=0.9$)와 같이 널링 지점들을 포함하는 띠의 형태는 사라지고 각각의 널링지점을 포함하는 독립된 띠를 가진다.

이러한 부엽 레벨에 의해 다중 널링 시 널링

분해능이 저하되는 것을 방지하기 위해서는 멀티빔 안테나 시스템을 설계할 때 부엽 레벨이 높지 않도록 해야 함을 알려 준다. 현재 시뮬레이션의 경우 개개 빔의 복사 패턴으로 1차 베셀 함수를 사용하고 있으므로 빔 패턴의 첫 번째 널이 영이 되지만 실제로는 그렇지 않으며 그럴 경우 근접한 빔의 영역에도 영향을 끼칠 수 있으므로 가능한 낮은 레벨을 가지도록 설계되어야 할 것이다.

2.3 한반도 지역에서의 널링 특성 분석

이러한 결과를 바탕으로 최종적으로 다중 빔 안테나를 한반도에 적용하여 분석하였다. 안테나의 위성 탑재 가능성을 고려하여 반사판의 크기를 2m 이하로 제한 할 경우, Ka 대역 수신주파수 30GHz를 기준으로 0.3도 이상의 반치각을 갖는 빔을 이용하여 다중 빔 안테나를 구성 할 수 있다. 따라서 한반도 빔 커버리지를 1.3도로 보았을 때, 다중빔 안테나 구현을 위한 빔의 개수는 최대 19개로 구성이 가능하다. 한반도와 같이 아주 작은 커버리지 내에서 존재하는 간섭 신호에 대한 멀티빔 시스템에서 널의 형성을 위해 한반도의 모양을 고려하여 반사판의 크기(D)가 140λ 로 약 0.45도 반치각을 갖는 10개 빔에 대한 경우와, 반사판의 크기(D)가 200λ 로 약 0.3도 반치각을 갖는 19개 빔에 대하여 분석하였다. 다중빔 안테나 빔의 중심은 10빔의 경우 위도 36, 경도 127도 50분으로 19빔은 위도 38도, 경도는 10빔과 동일한 위치로 가정하였으며, 위성의 위치는 모두 경도 113도로 가정하였다. 또한 통신위성의 특성상 이득 평탄도 및 구현성을 고려하여 α 는 1을 선택하였다.

빔의 방향을 (n, m) 으로 표현할 경우, Fig. 7와 같이 10개의 빔은 $(0, 0)$, $(1, 0)$, $(1, 1)$, $(0, 1)$, $(-1, 0)$, $(-1, -1)$, $(0, -1)$, $(-1, 1)$, $(-2, 0)$, $(-2, -1)$ 로 선정하였으며, 한반도 지형을 감안하여 uv로 나타내는 복사 좌표계를 시계방향으로 45도 회전하였다. 19빔 또한 동일한 방법을 사용하여 Fig. 8에 표현하였다. 이를 한반도에 적용한 복사 패턴은 Fig. 9와 같다.

Figure 10과 11은 온성과 평양에 재밍 신호가 위치했을 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 정확히 간섭 신호가 출현한 방향에 널링 포인트가 형성되며 널링 포인트 주위를 제외한 나머지 커버리지 내에서는 재머가 없는 복사 패턴과 비교하여 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 안테나 널링에 의한 재밍 신호의 감소 효과로 인해 10빔과 19빔에서 -60dB 이상의 억압 성능을 보인다. 그러나, -10dB 이득 감소 영역까지를 통신영역으로

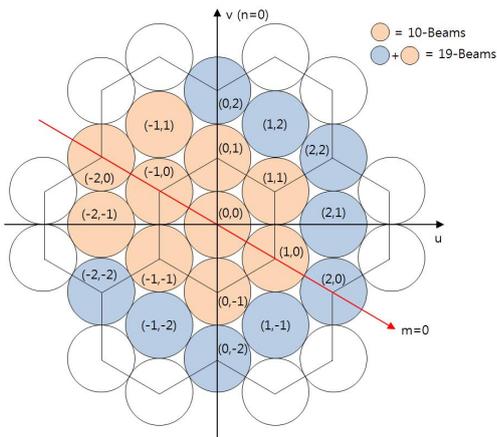


Fig. 8. Coordinates for the case of 10&19-beams

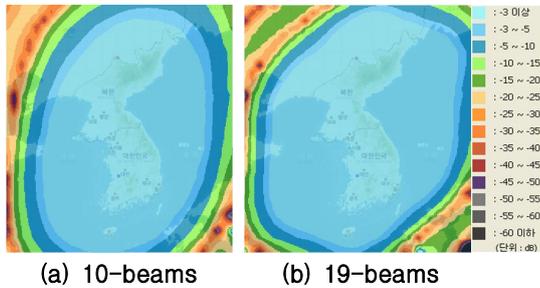


Fig. 9. Multi-beam patterns for Korean Peninsula

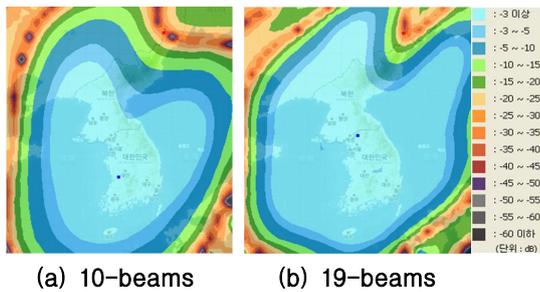


Fig. 10. Nulling patterns at Onsong

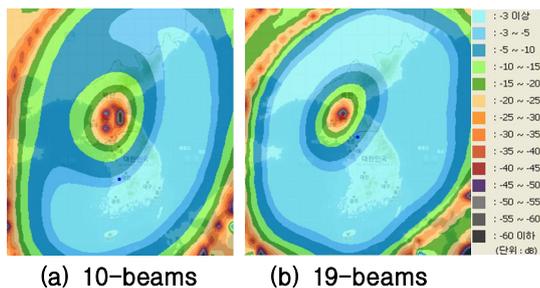


Fig. 11. Nulling patterns at Pyongyang

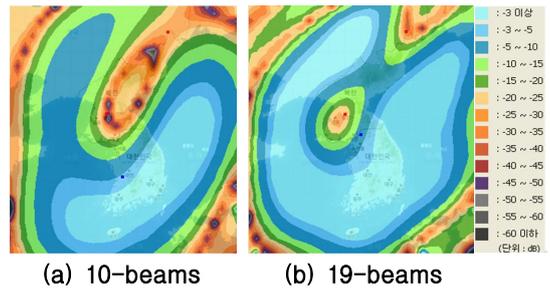


Fig. 12. Nulling patterns at Pyongyang & Onsong

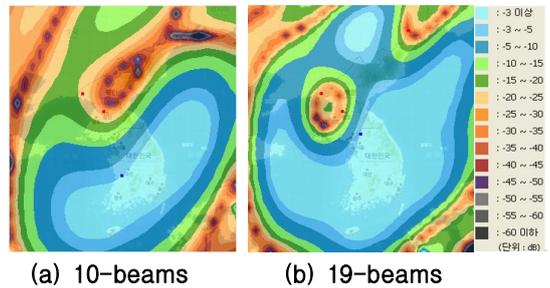


Fig. 13. Nulling patterns at Pyongyang, Onsong & Sinuiju

가정했을 경우, 재밍 신호 발생 지역에서 통신 가능 영역까지의 거리는 각각 222km와 120km로 약 100km의 거리차가 있음을 알 수 있다. 개별 빔의 크기, 즉 안테나 크기에 따른 물리적 한계로 볼 수 있다.

다음으로 Fig. 12, 13과 같이 평양과 온성 및 신의주에 다중 재밍 신호가 위치 했을 경우, Fig. 6 및 Fig. 7의 시뮬레이션 결과와 같이 2개의 재머의 위치가 다중 빔 안테나의 개별 빔간의 상호작용으로 인해 널링 패턴의 차이가 급격하게 일어나게 됨을 볼 수 있다. 반치각과 첫 번째 부엽의 위치가 약 0.45도와 약 0.7도인 빔으로 구성된 10빔은 개별 빔간의 상호작용으로 인해 1개의 띠를 넓게 형성하고 있는 반면에 19빔은 약 0.3도의 반치각과 약 0.5도에 첫 번째 부엽을 갖기 때문에 각 재밍 신호 위치에서 독립적으로 널링하는 특성을 갖는다. 재밍 신호의 개수에 따라 띠의 크기가 변하게 되며, 개수에 따른 띠의 형상은 큰 차이가 없다. 그러나 통신 가능 영역에서의 넓이의 차이는 매우 큼을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 다중 빔 안테나를 널링 안테나

구조로 선정하여, 널링 알고리즘을 전개하고, 알고리즘에 따른 다중 빔 안테나의 널링 특성을 분석하였으며, 최종적으로 한반도 적용을 위해 위성 탑재체에 적용 가능한 범위 내에서 10개 및 19개의 다중 빔을 갖는 안테나의 널링 특성을 분석하였다. 분석 결과를 통해 반사판의 크기가 200λ 이고, 빔의 개수가 19일 경우에 항재밍 성능이 가장 우수함을 확인 할 수 있었다. 북한의 최북단에서 재머가 발생 할 경우에는 주빔의 위치 이동 없이 남한에서의 통신 영역이 동일하게 나타나지만, 남한과 근접되어 있는 평양에서 재머가 발생 할 경우에는 재밍 신호 발생 지역에서 통신 가능 영역까지의 거리는 약 100km의 거리 차이가 있음을 보이며, 다수의 재머가 동시에 발생했을 경우에 통신 영역의 차이가 더 크게 벌어진다. 따라서 재밍 신호를 억압하여 지속적인 위성 통신을 유지하기 위해서는 빔의 개수와 개별빔의 빔폭, 즉 안테나의 크기에 매우 의존적임을 알 수 있다.

따라서 이러한 다중 빔 안테나의 특성에 대한 결과를 바탕으로 추후 반사판 형태를 갖는 다중 빔 안테나 구조의 위성 탑재 널링 안테나 구현 시, 동작 주파수, 개별 급전혼간의 간격 및 부엽의 크기, 반사판의 크기 등의 설계 파라미터로 활용이 가능할 것이다.

References

- 1) Sangwoo Han, Jongwoo Seo "Future development directions for the next generation military satellite communication Systems" *KICS*, vol.26 no.3, pp.24-31, Mar. 2009.
- 2) Kai-Bor Yu, "Adaptive beamforming for satellite communication with selective earth coverage and jammer nulling capability", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 12, Dec. 1996.
- 3) Seungwon Choi, Donghee Shim, "A novel

Adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 1793-1806, Sep. 2000.

- 4) WILLIAM F. GABRIEL, "Adaptive arrays-An introduction", *Proc. IEEE*, vol. 64, No. 2, pp.239~272, Feb. 1976.

- 5) R. L. Haupt, "phase-only adaptive nulling with genetic algorithms", *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 45, no. 5, pp. 1009-1015, Jun. 1997.

- 6) Yongjun Lee, Jongwoo Seo, "Study on nulling antenna using genetic algorithm with opposite-sign phase" *KIEES*, 21(6), pp.690-697, Jun. 2010.

- 7) Sohyeun Yun, Manseok Uhm, Jangsup Choi, Inbok Yom, "Multibeam reflector antenna for Ka-Band communication satellite", *KIEES*, 23(6), pp. 756~759, Jun. 2012.

- 8) C. A. Balans, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd Edition, *John Wiley & Sons*, 1997.

- 9) JOSEPH T. MAYHAN, "Nulling limitations for a multiple beam antenna", *Trans. IEEE*, vol. AP-24, no. 6, Nov., 1976, pp.769~779

- 10) JOSEPH T. MAYHAN, "adaptive nulling with multiple-beam antennas", *Trans. IEEE*, vol. AP-26, no. 2, pp.267~273, 1978.

- 11) Gary D. Gordon, Walter L. Morgan, *Principles of Communications Satellites*, 1st Edition, *Wiley-Interscience*, 1993.

- 12) Sudhakar K. Rao, "Parametric Design and Analysis of Multiple-Beam Reflector Antennas for Satellite Communications", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 4, pp.26~34, Aug. 2003.