

# Squint-less Phased Array Antenna Near-field Subwavelength Focusing with True-time Optical Delay Line

Young Jin Jung<sup>†</sup>

*School of Electricity and Electronics, Ulsan College, 57, Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea*

(Received February 7, 2019; Revised April 11, 2019; Accepted April 15, 2019)

The near-field subwavelength squint-less focusing system of a phased array antenna is designed and demonstrated by numerical simulation. The Huygens-Fresnel principle is applied to numerical simulation for calculation of the phased array antenna at microwave frequency. It was shown that beam squinting can be eliminated, utilizing true-time optical delay lines based on a chirped fiber grating in the proposed system. Furthermore, subwavelength focusing with high numerical aperture can be achieved by considering the fact that the array elements of the phased-array antenna can be treated as diffractive elements in an optical lens system. Also, side lobes can be suppressed by decreasing the distance between element antennas to less than half of the wavelength.

Keywords: Phased array antenna, Subwavelength focusing, True-time optical delay line

OCIS codes: (050.1590) Chirping; (050.5080) Phase shift; (110.5100) Phased-array imaging systems; (350.2770) Gratings; (350.5730) Resolution

## 광 지연선로를 이용한 스퀀팅이 없는 위상배열 안테나의 근접장 서브파장 포커싱

정영진<sup>†</sup>

울산과학기술대학교 전기전자공학부

Ⓞ 44610 울산시 남구 대학로 57

(2019년 2월 7일 받음, 2019년 4월 11일 수정본 받음, 2019년 4월 15일 게재 확정)

본 연구에서는 광 지연선로를 이용한 스퀀팅(squinting)이 없는 위상배열 안테나의 근접장 미세파장 포커싱(subwavelength focusing)을 디자인하고 전산모사를 통해 검증하였다. 마이크로파 파장에서 위상배열 안테나의 수치적 계산을 위해 호이겐스-프레넬(Huygens-Fresnel) 원리를 적용하였다. 제안하는 시스템은 칩 광섬유 격자(chirped fiber grating)에 기반한 광 지연선로를 이용하여 빔 스퀀팅이 생기지 않는다는 것을 전산모사를 통해 확인하였다. 그리고 개별 안테나의 배열은 광학렌즈시스템에서 회절 소자로 간주할 수 있음에 착안해 높은 개구율(numerical aperture)을 구현하고 미세파장 포커싱을 얻었다. 또한, 위상배열 안테나의 안테나 사이 거리를 반파장 이하로 줄여 사이드 로브를 억제할 수 있음을 보였다.

Keywords: 위상배열 안테나, 미세파장 포커싱, 광 지연선로

OCIS codes: (050.1590) Chirping; (050.5080) Phase shift; (110.5100) Phased-array imaging systems; (350.2770) Gratings; (350.5730) Resolution

### I. 서 론

위상배열 안테나 시스템은 안테나 신호의 지향 각도를 조절하는데 전통적으로 많이 활용되고 있다. 안테나의 신호가 빛과 같은 전자기파라는 관점에서 볼 때 개별 안테나는 광학에서 점 광원(point source) 혹은 슬릿 slit)에 해당되며, 안테나의 배열은 점 광원 혹은 회절 슬릿의 배열에 해당한다고

할 수 있다. 이 점 광원의 배열은 렌즈를 이용한 전통적인 빛의 세기 분포 조절로는 하지 못하는 다양한 빛 분포를 만들 수 있어 반도체 공정의 노광(photolithography) 패턴 형성<sup>[1]</sup>, 메타물질의 일종으로 부르기도 하며 미세파장 포커싱(subwavelength focusing) 등<sup>[2,3]</sup> 다양하게 활용되고 있다.

위상배열 안테나는 지향각을 조절하는 것 이외에 신호의 세기를 근접장(near field) 영역에서 조절하는 다양한 연구와

<sup>†</sup>E-mail: [y.j.jung@outlook.com](mailto:y.j.jung@outlook.com), ORCID: 0000-0001-7267-2365

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

그 응용이 제안되고 있다. 특별히 근접장에서의 포커싱은 RFID (radio frequency identification)의 근접장에서의 성능을 향상시키거나, 비접촉 비파괴 방식의 마이크로파 물질 탐지, 의료용 이미징 시스템의 해상도 향상, 국소지역 온도센서 등에 활용될 수 있다<sup>47</sup>.

한편, 위상배열 안테나의 문제점 중 하나는 주파수에 따라 지향각도가 달라지는 빔 스킨팅 (beam squinting) 현상으로 안테나의 넓은 주파수 대역에서 문제를 일으킨다. 이러한 현상을 극복하기 위해 광 지연선로 (optical true time delay line)에 기반한 위상 배열 안테나의 지향 각 조절에 대해 보고되고 있다<sup>8,23</sup>. 이 방법은 위상배열 안테나의 근접장 영역의 포커싱에서도 동일하게 활용될 수 있다. 그러나 광 지연선로에 기반한 위상 배열 안테나를 이용한 근접장에서의 광 분포 조절 적용에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 칩 광섬유 격자 (chirped fiber grating, CFG)에 기반한 광 지연선로를 활용하여 빔 스킨팅이 없는 근접장 포커싱을 위한 위상배열 안테나 시스템 구성을 제안하였다. 또한, 제안한 시스템에 대한 전산모사 방법을 제시하고 제안한 시스템의 성능을 전산모사를 통해 확인하였다.

## II. 위상배열 안테나의 근접장 계산

전자기파의 분포를 계산하기 위해 그림 1과 같이 위상배열 안테나가 배치되어 있는  $(\xi, \eta)$  평면과 관측 위치의  $(x, y)$  평면을 설정할 수 있다. 개별 안테나의 방사형태가 모든 방향에 걸쳐서 일정하다고 가정하면 개별 안테나의 방사를 점 파원 (point source)로 가정할 수 있다. 그리고 안테나 배열의 간섭에 의한 방사 패턴을 계산하기 위해  $(\xi, \eta)$  평면의  $P_1$  지점에 있는 미소면적 (infinitesimal area)  $dS$ 에 대한 전기장을 복소수 형식의  $U(P_1) = Ae^{j\phi}$ 로 표현한다. 여기서,  $A$ 와  $\phi$ 는 각각 전기장의 크기와 위상이다.

또한,  $P_1$  지점의 파원으로부터  $P_0$  지점에 도달하는 미소 전기장  $dE(P_0)$ 는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다<sup>24,25</sup>.

$$dE(P_0) = U(P_1) \frac{\exp[j(kr_{01} - \omega t)]}{r_{01}} dS \quad (1)$$

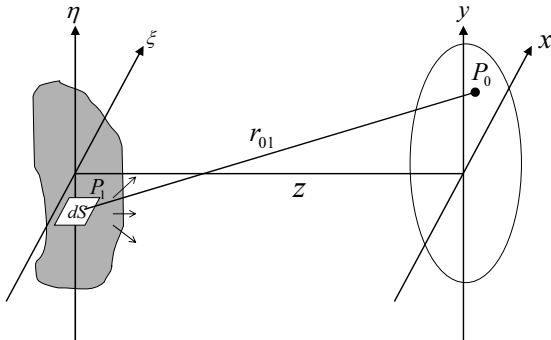


Fig. 1. Coordinate definition for the calculation of electromagnetic field distribution.

여기서  $r_{01}$ 는  $P_1$  지점으로부터  $P_0$  지점까지의 거리이며,  $k$ 는 파수벡터 (wavenumber vector),  $\lambda$ 는 안테나의 파장,  $\omega$ 는 각주파수, 그리고  $t$ 는 시간이다.

그리고 전체 안테나로부터  $P_0$  지점  $(x, y, z)$ 에 도달한 전체 전기장  $U(x, y, z)$ 는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$U(x, y, z) = \int dE(P_0) \quad (2)$$

이 수식은 직각 좌표계 (rectangular coordinate)로 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$U(x, y, z) = \iint U(\xi, \eta) \frac{\exp(jk\sqrt{z^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} - j\omega t)}{\sqrt{z^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} d\xi d\eta \quad (3)$$

여기서  $z$ 는  $(\xi, \eta)$  평면으로부터  $(x, y)$  평면까지의 거리이다. 이 수식으로부터  $(x, y, z)$ 의 모든 포인트에 대해 전기장을 계산하여 위상배열 안테나 빔의 세기분포를 나타낼 수 있다. 그러므로 식 (3)을 이용하여 임의의 형태로 배열된 위상배열 안테나에 대한 전파 세기 분포를 분석할 수 있다.

## III. 광 지연선로를 이용한 근접장 포커싱 방법

각각의 안테나의 위치를  $P_1 = (\xi_1, \eta_1), P_2 = (\xi_2, \eta_2), \dots, P_N = (\xi_N, \eta_N)$ 라고 하고 각각 안테나에 주어진 지연 시간을  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_N$ 이라고 하면  $(x, y, z)$  지점에서의 전기장의 크기는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$U(x, y, z) = \sum_{n=1}^N U(P_n) \frac{\exp[j\{kr_{0n} - \omega(t + \Delta\tau_n)\}]}{r_{0n}} \quad (4)$$

따라서 모든 안테나의 위상이 특정한 시간에  $P_0 = (x, y, z)$  지점에서 결맞음 (in-phase) 되도록 하려면  $\Delta\tau_n$ 은 식 (5)의 조건을 만족해야 한다.

$$(kr_{0n} - \omega\Delta\tau_n) = \omega\left(\frac{r_{0n}}{c} - \Delta\tau_n\right) = constant \quad (5)$$

여기서  $r_{0n} = \sqrt{(x-\xi_n)^2 + (y-\eta_n)^2 + z^2}$ 이므로 간략하게 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 이러한 조건을 만족시키도록 각각의 개별 안테나에 시간지연을 주면, 원하는  $P_0 = (x, y, z)$  지점에 신호를 포커싱할 수 있게 된다.

$$\sqrt{(x-\xi_n)^2 + (y-\eta_n)^2 + z^2} - c\Delta\tau_n = constant \quad (6)$$

시간 지연을 위한 광 지연선로 시스템은 다양하게 구현될 수 있으나, 그 중에 다양한 응용으로 가장 많이 보고된 방법 중 하나는 칩 광섬유 격자이다<sup>10,17,20</sup>. 그리고 원하는 시간지연을 개별 안테나에 주기 위해 광대역 광원과 가변 필터를

활용할 수 있다<sup>[10]</sup>. 칩 광섬유 격자는 주파수에 따라 시간지연을 달리 겪기 때문에 파장을 선택하여 지연시간을 선택할 수 있다.

그림 2와 같은 칩 광섬유 격자 광 지연선로에 기반한 위상 배열 안테나 시스템을 고려해 보았다. 먼저, 광대역 광원(broadband light source)에 RF (radio frequency) 신호를 변조(modulation)한다. 변조된 신호는 앞의 실험에서 사용된 칩 광섬유 격자를 이용하여 광 신호 파장에 대해 선형적으로 다른 지연시간을 겪도록 한다. 그리고 각각의 개별 안테나는 요구되는 지연시간에 해당하는 파장을 선택하여 포토다이오드를 통해 신호를 받아 안테나로 송신하여 개별 안테나는 설계한 시간지연을 겪도록 할 수 있다.

한편, 시간 지연 시스템의 가능한 최대 지연시간에 따라 위상 배열 안테나의 근접장에서 가능한 포커싱 영역이 달라진다. 광섬유 격자가 개별 안테나에 부여할 수 있는 최대 시간 지연이  $\Delta t_{max}$  인 경우, 그림 3에서와 같이 1번 안테나로부터 포커싱 지점까지의 거리를  $r_1$ ,  $N$ 번 안테나로부터의 거리를  $r_N$ 이라고 하고 전자기파의 군속도(group velocity)를  $c$  ( $\approx 3 \times 10^8$ )라고 하면 식 (7)의 조건을 만족하는 영역이 포커싱 가능한 영역이 된다.

$$|r_1 - r_N| < c \cdot \Delta t_{max} \quad (7)$$

따라서 식 (8)과 같이 쌍곡선(hyperbolic curve) 영역 안으로 들어오는 영역이 위상배열을 통해 포커싱할 수 있는 영역이 된다.

$$\frac{\xi^2}{(c \cdot \Delta t_{max})^2} - \frac{z^2}{(L/2)^2 - (c \cdot \Delta t_{max})^2} < 1 \quad (8)$$

칩 광섬유 격자를 활용한 지연 시간은 설계에 따라 다양하게 만들어질 수 있겠으나 기존에 보고된 칩 광섬유 격자를 참고하여<sup>[10]</sup> 주파수에 따라 대략 최대  $\Delta t_{max} = 1000$  [ps]의 시간 지연으로 고려하여 어레이 길이  $L$ 의 값의 변화에 따른 포커싱 가능한 영역을 그림 3에 표시하였다.  $\Delta t_{max} = 1000$  [ps]를 안테나 신호에 줄 수 있는 가장 큰 경로 차이( $c \cdot \Delta t_{max}$ )로 환산하면 약 30 [cm]이며,  $L$ 값이 30 [cm]에 비해 상대적으로 큰 경우 위상배열 안테나로 조절할 수 있는 영역이 줄어드는 것을 알 수 있다.

#### IV. 전산모사 결과

제안된 시스템의 동작을 확인하기 위해 그림 4와 같이  $x$ -축을 따라 일차원 배열된 위상배열 안테나의 포커싱에 대한 전산 모사를 수행하였다. 먼저 주파수 변화에 따른 빔 스캔

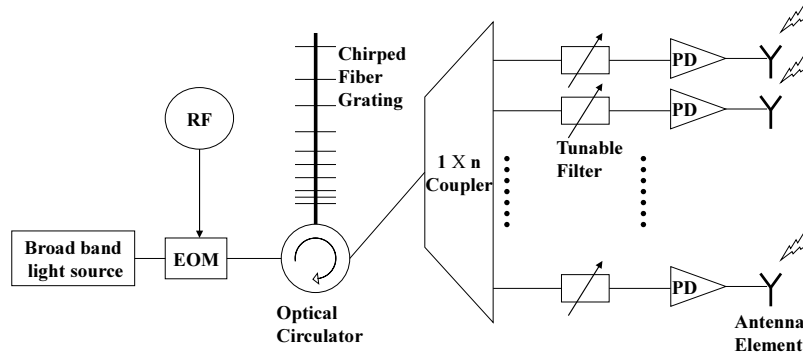


Fig. 2. Arbitrary time delay feeding system employing tunable filters and chirped fiber grating; EOM: electro-optic modulator; PD: photodiode.

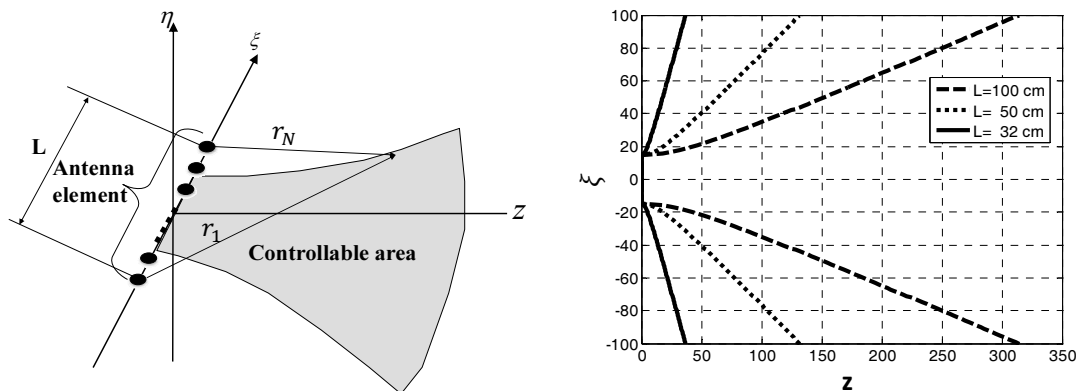


Fig. 3. Controllable area of the phased array antenna system.

팅이 발생하지 않고 초점이 잘 유지되는지를 제안된 시스템과 기존의 위상배열 안테나를 비교 확인해 보았다. 앞서 식 (3)을 통해 설명한 근접장에서 전자기파의 세기 계산방법을 이용하여 표 1에 제시한 매개변수의 시스템에 대해 주파수를 변화시키며 초점 형성을 살펴보았다.

그림 5는 근접장 영역에 임의의 지점( $x=5$  [cm],  $z=15$  [cm])에 포커싱한 전산모사의 결과를 보여주고 있다. 그림 5의 (a), (b), (c)는 제안한 광 지연선로를 이용한 포커싱에 대해 주파

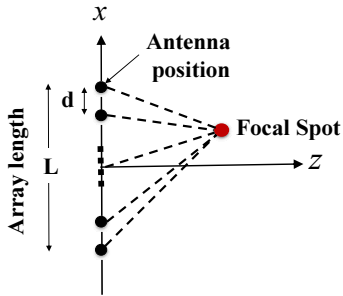


Fig. 4. Description of the phased array antenna under numerical simulation system.

Table 1. Simulation parameters for observing beam squinting caused by frequency detuning

Parameter	Description	Values
$d$	Space between antennas	0.57 [cm]
$L$	Antenna array length	20 [cm]
$f$	Frequency	25 [GHz] (detuned -10, +10 [GHz])
Focal point		$(x, z) = (5, 15)$ [cm]

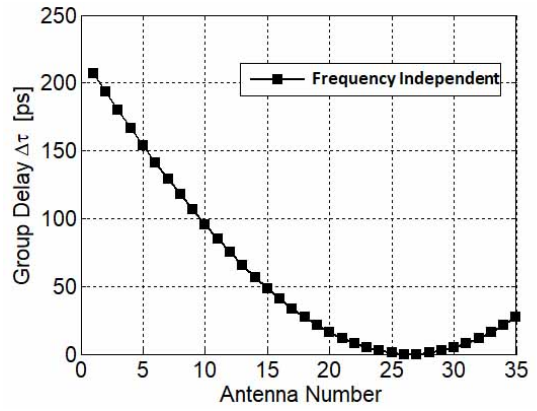


Fig. 6. Required group delay for focusing at  $x=5$  [cm] and  $z=15$  [cm] in the case of the proposed array antenna employing true time optical delay lines.

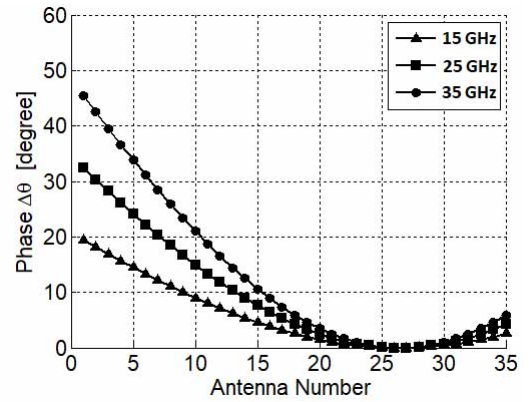


Fig. 7. Required phase difference for focusing at  $x=5$  [cm] and  $z=15$  [cm] in the case of general phased array antenna.

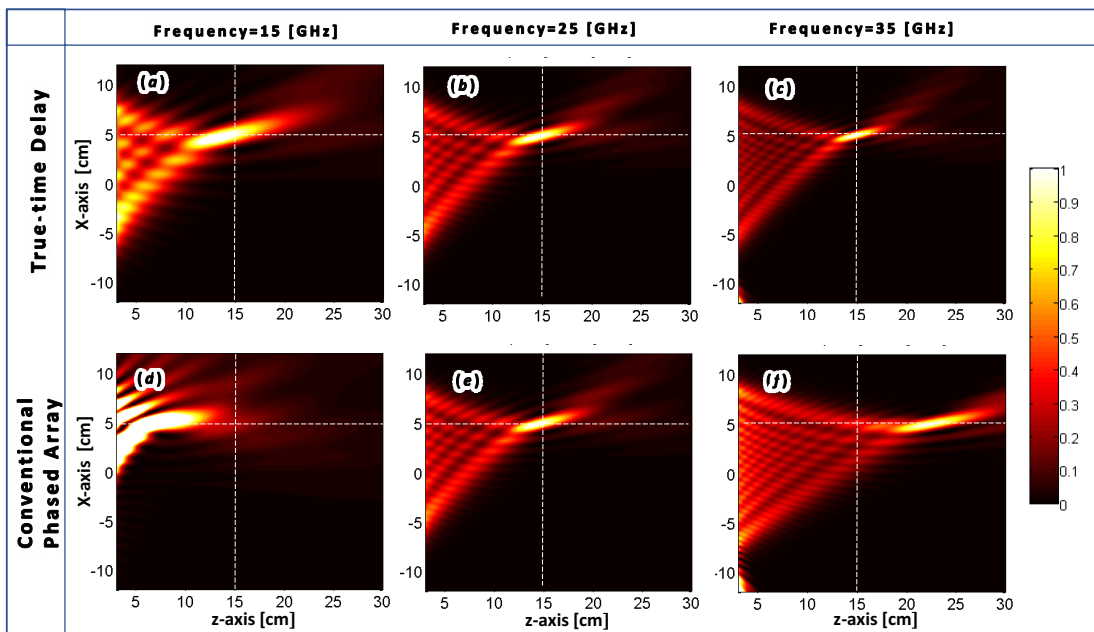


Fig. 5. Comparison of beam squinting characteristics between conventional phased array antenna and array antenna with true time delay lines.

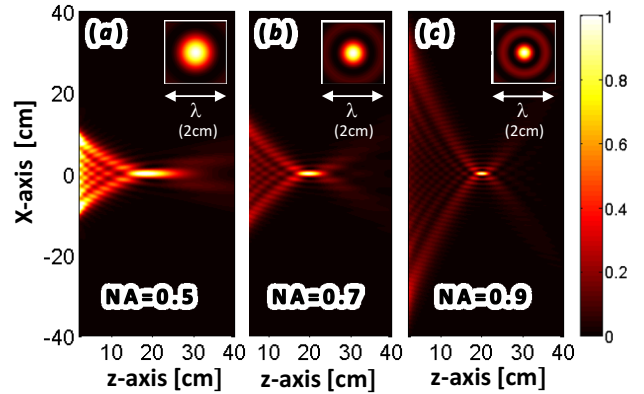
수를 달리한 경우를, 그리고 (d), (e), (f)는 주파수 25 [GHz] 기준으로 설계된 일반적인 위상배열 안테나에서 주파수를 달리한 경우를 보여주고 있다. 초점의 위치 변화를 극단적으로 보이기 위해 주파수를 25 [GHz]를 기준으로 -10 [GHz], +10 [GHz]의 변화를 주었다. 그림 5의 (a), (b), (c)에서 볼 수 있듯이 제안한 광 지연선로를 이용한 근접장 포커싱의 경우는 주파수가 크게 바뀌어도 스킨팅이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면, 그림 5(e)와 같이 25 [GHz]에 맞추어 설계된 일반 위상배열 안테나는 25 [GHz]에서는 설계된 지점에 정확히 포커싱되었으나 주파수가 변화된 (d), (e)의 경우는 포커싱 지점을 크게 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 광 지연선로를 사용하는 경우는 주파수에 관계없이 포커싱을 위해 요구되는 시간지연이 그림 6과 같이 동일하지만 일반적인 위상배열 안테나는 그림 7과 같이 주파수에 따라 포커싱을 위해 요구되는 위상이 다르기 때문에 발생하는 현상이다.

두 번째로, 근접장에서 회절한계(diffraction limit)를 극복할 수 있는 미세파장 포커싱 특성을 살펴보았다. 위상배열 안테나에 의한 포커싱은 굴절방식의 렌즈에 의한 포커싱이 아닌 회절방식의 렌즈에 의한 포커싱으로 간주될 수 있으므로 개구율을 크게 해 1에 근접하게 할 수 있다.

표 2에 제시한 매개변수로 안테나 사이의 거리  $d$ 를 일정하게 하고 안테나 개수를 통해 어레이 전체 길이  $L$ 을 바꾸어 개구율 NA (numerical aperture) 값을 변화시켜 초점의 반치전폭(full width at half maximum) 값을 관찰하였다. 이때,  $d$ 를 일정하게 유지한 것은 간섭무늬의 영향으로 생기는 전자기파의 세기 분포 변화의 영향을 최소화하기 위함이다. 그림 8에서 전자기파의 세기분포 결과를 나타냈다. 개구율 값이 증가하여 1에 근접할수록 그 초점의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(a)에 횡단 방향( $x$ -축)으로의 세기 분포를 나타냈으며, 그림 9(b)는 개구율에 따른 초점의 크기를 보여주고 있다. 초점의 반치전폭 값은 개구율이 증가할수록 작아져 NA=0.95인 경우  $0.36\lambda$  수준의 초고해상도 초점형성이 가능함을 확인할 수 있다.

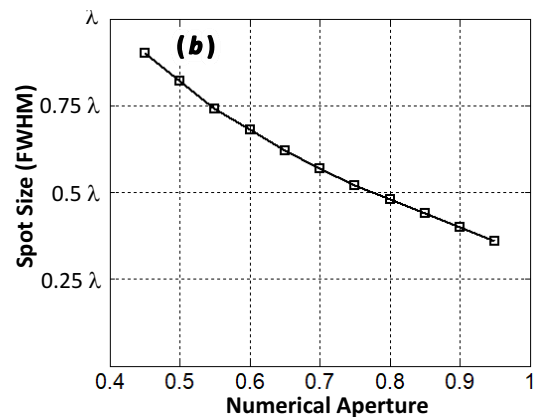
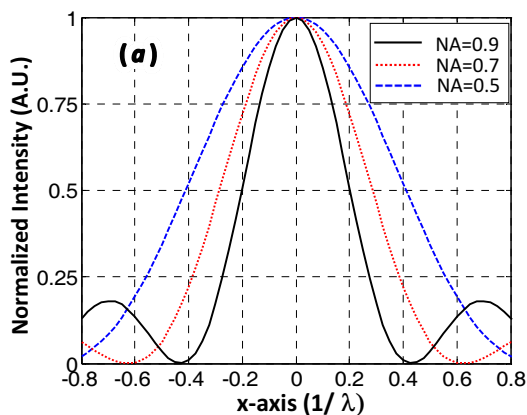
**Table 2.** Simulation parameters for observing subwavelength focusing

Parameter	Description	Values
$d$	Space between antennas	$1.0 \lambda$
$L$	Antenna array length	Varying   20~121 [cm]
NA	Numerical aperture	Varying   0.45~0.95
$f$	Frequency	15 [GHz]
Focal point		$(x, z) = (0, 20)$ [cm]



**Fig. 8.** Comparison of the spot size of focal point with numerical aperture variation.

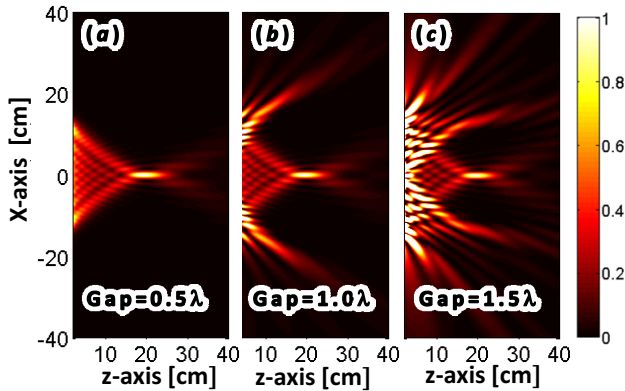
세 번째로, 안테나 사이의 거리에 따른 사이드 로브(side lobe) 생성 특성을 살펴보았다. 표 3에 제시한 값으로 20 [cm] 떨어진 곳에 안테나 사이의 거리를 변화시키며 포커싱하였다. 그림 10은 전산모사 결과 전자기파의 세기 분포를 나타냈다. 안테나 사이의 거리가 반파장보다 커질수록 초점을 향하여 2차적인 결맞음(in phase)으로 인한 사이드 로브의 생성이 심해지는 것을 확인할 수 있다. 그림 11은 초점에서 횡단 방향( $x$ -축)으로의 세기 분포를 나타냈다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 안테나 사이의 거리  $d=1.5\lambda$ 인 경우와  $d=1.0\lambda$ 인 경우 각각 초점 세기의 32%, 14%에 해당하는 사이드 로브가



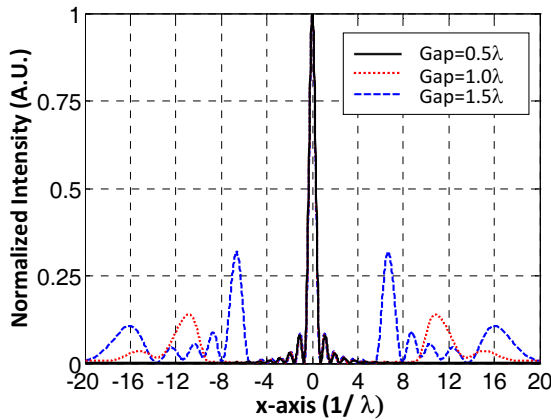
**Fig. 9.** Subwavelength focusing characteristics. (a) Lateral direction ( $x$ -axis) intensity profile of the focal spot with numerical aperture variation. (b) Spot size as a function of the numerical aperture.

**Table 3.** Simulation parameters for observing side lobes

Parameter	Description	Values	
		$d$	Space between antennas
$L$	Antenna array length	30 [cm]	
NA	Numerical aperture	6	
$f$	Frequency	15 [GHz]	
Focal point		$(x, z) = (0, 20)$ [cm]	



**Fig. 10.** Comparison of intensity profile while varying the space between antennas.



**Fig. 11.** Comparison of the lateral direction ( $x$ -axis) intensity profile of focal spot with varying the gap between antennas.

발생하는 반면  $d=0.5\lambda$ 인 경우에는 사이드 로브의 영향이 미미한 것을 확인할 수 있다. 사이드 로브의 영향을 최소화하기 위해서는 반파장 수준의 안테나 사이의 거리가 권장된다.

### V. 결 론

근접장 프레넬 영역의 공간에서 주파수에 관계없이 빔 스קי팅이 발생하지 않는 광 지연선로를 활용한 위상배열 안테나 포커싱을 제안하였다. 제안한 시스템의 디자인 방법을 제시하고 디자인된 시스템에 대한 전산모사 방법을 제시하였다. 제안하는 시스템에 대해 15~35 [GHz] 대역 전자기파 신호

의 위상배열 안테나를 이용하여 대략 20 [cm] 거리 수준의 근접장에서 포커싱 특성을 전산모사를 통해 확인하였다. 제안한 시스템은 광 지연선로를 이용하였기 때문에 주파수 변화에 따르는 빔 스קי팅이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 또한, 회절에 의한 포커싱이므로 개구율을 크게 설계하여 회절한계를 극복한 미세파장 포커싱이 가능한 것을 확인하였다. 그리고 위상배열 안테나를 이용한 포커싱시 발생하는 사이드 로브의 문제를 전산모사를 통해 확인하고 사이드 로브를 억제하기 위한 안테나 사이의 거리 기준을 제시하였다. 본 연구는 광학에서 잘 발전되어 있는 포커싱 기술을 마이크로파 수준의 전자기파에 적용하는 시스템을 제안 및 디자인하고 그 성능을 전산모사를 통해 확인한 것이며, 높은 해상도로 파원의 위치파악, 무선통신, 무선전력 전송 등 포커싱이 필요한 분야에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2017년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨.

### References

1. C. P. Fucetola, A. A. Patel, E. E. Moon, T. B. O'Reilly, and H. I. Smith, "Coherent diffraction lithography: Periodic patterns via mask-based interference lithography," *J. Vac. Sci. Technol., B: Microelectron. Nanometer Struct. Process., Meas., Phenom.* **27**, 2947-2950 (2009).
2. T. Liu, S. Yang, and Z. Jiang, "Electromagnetic exploration of far-field superfocusing nanostructured metasurfaces," *Opt. Express* **24**, 16298-16308 (2016).
3. Y. J. Jung, D. Park, S. Koo, S. Yu, and N. Park, "Metal slit array Fresnel lens for wavelength-scale optical coupling to nanophotonic waveguides," *Opt. Express* **17**, 18852-18857 (2009).
4. P. Nepa and A. Buffi, "Near-field-focused microwave antennas: Near-field shaping and implementation," *IEEE Antennas Propag. Mag.* **59**, 42-53 (2017).
5. P. Nepa, A. Buffi, A. Michel, and G. Manara, "Technologies for near-field focused microwave antennas," *Int. J. Antennas Propag.* **2017**, 7694281 (2017).
6. A. Buffi, P. Nepa, and G. Manara, "Design criteria for near-field-focused planar arrays," *IEEE Antennas Propag. Mag.* **54**, 40-45 (2012).
7. K. D. Stephan, J. B. Mead, D. M. Pozar, L. Wang, and J. A. Pearce, "A near field focused microstrip array for a radiometric temperature sensor," *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55**, 1199-1203 (2007).
8. I. Frigyes and A. J. Seeds, "Optically generated true-time delay in phased-array antennas," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **43**, 2378-2386 (1995).
9. X. Xu, J. Wu, T. G. Nguyen, T. Moein, S. T. Chu, B. E. Little, R. Morandotti, A. Mitchell, and D. J. Moss, "Photonic

- microwave true time delays for phased array antennas using a 49 GHz FSR integrated optical micro-comb source,” *Photon. Res.* **6**, B30-B36 (2018).
10. B. Ortega, J. L. Cruz, J. Capmany, M. V. Andrés, and D. Pastor, “Variable delay line for phased-array antenna based on a chirped fiber grating,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **48**, 1352-1360 (2000).
  11. Y. Liu, J. Yang, and J. Yao, “Continuous true-time-delay beamforming for phased array antenna using a tunable chirped fiber grating delay line,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14**, 1172-1174 (2002).
  12. H. Lee, H. Jeon, and J. Jung, “Optical true time-delay beam-forming for phased array antenna using a dispersion compensating fiber and a multi-wavelength laser,” in *Proc. Fly by Wireless Workshop 2011 4th Annual Caneus* (Montreal, Canada, Jun. 2011), pp. 1-4.
  13. W. Ng, A. A. Walston, G. L. Tangonan, J. J. Lee, I. L. Newberg, and N. Bernstein, “The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay,” *J. Lightw. Technol.* **9**, 1124-1131 (1991).
  14. X. Ye, F. Zhang, and S. Pan, “Compact optical true time delay beamformer for a 2D phased array antenna using tunable dispersive elements,” *Opt. Lett.* **41**, 3956-3959 (2016).
  15. J. Wang, P. Hou, H. Cai, J. Sun, S. Wang, L. Wang, and F. Yang, “Continuous angle steering of an optically-controlled phased array antenna based on differential true time delay constituted by micro-optical components,” *Opt. Express* **23**, 9432-9439 (2015).
  16. M. Duan and J. Ma, “Wide range and high resolution true time delay unit for phased array antenna,” in *Proc. Asia Communications and Photonics Conference* (Hangzhou, China, Oct. 2018), pp. 1-3.
  17. J. Zhao, Z. Ding, F. Yang, and H. Cai, “Configurable photonic true-time delay line based on cascaded linearly chirped fiber bragg grating,” in *Proc. International Topical Meeting on Microwave Photonics* (Toulouse, France, Oct. 2018), pp. 1-4.
  18. N. Shi, L. Zhang, S. Sun, J. Tang, M. Li, W. Li, and N. Zhu, “X-band optically steered phased array antenna with ultra-fast beam scanning,” in *Proc. International Conference on Optical Communications and Networks* (Wuzhen, China, Aug. 2017), pp. 1-3.
  19. R. Rotman, M. Tur, and L. Yaron, “True time delay in phased arrays,” *Proc. IEEE* **104**, 504-518. (2016).
  20. J. L. Cruz, B. Ortega, M. V. Andres, B. Gimeno, D. Pastor, J. Capmany, and L. Dong, “Chirped fibre Bragg gratings for phased-array antennas,” *Electron. Lett.* **33**, 545-546 (1997).
  21. H. Zmuda, R. A. Soref, P. Payson, S. Johns, and E. N. Toughlian, “Photonic beamformer for phased array antennas using a fiber grating prism,” *Photonics Technol. Lett.* **9**, 241-243 (1997).
  22. C. Chung, X. Xu, G. Wang, Z. Pan, and R. T. Chen, “On-chip optical true time delay lines featuring one-dimensional fishbone photonic crystal waveguide,” *Appl. Phys. Lett.* **112**, 071104 (2018).
  23. T. Tatoli, D. Conteduca, F. Dell’Olio, C. Ciminelli, and M. N. Armenise, “Graphene-based fine-tunable optical delay line for optical beamforming in phased-array antennas,” *Appl. Opt.* **55**, 4342-4349 (2016).
  24. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics* (Mcgraw-Hill Internal editions, 1996).
  25. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997).