

광대역 빔 조향을 위한 위상 배열 안테나의 실시간 지연 위상 천이기 구성에 관한 연구

정진우^{*,1)} · 류지호¹⁾ · 박재돈¹⁾ · 서종우¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제2기술연구본부

A Study on Configuration of True Time Delay Phase Shifter for Wideband Beam Steering Phased Array Antenna

Jinwoo Jung^{*,1)} · Jiho Ryu¹⁾ · Jaedon Park¹⁾ · Jongwoo Seo¹⁾

¹⁾ The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 19 September 2016 / Revised 13 February 2017 / Accepted 14 April 2017)

ABSTRACT

We investigate the performance of a true time delay(TTD) phase shifter to reduce the beam squint caused by frequency changes of a phased array antenna in wideband communication systems. To design a high gain phased array antenna, we need a long TTD, which causes high RF loss, low resolution and large dimension of TTD phase shifters. To overcome the problems, we propose a schematic of dual TTD phase shifters, which consists of short time delay(STD) in radio frequency(RF) part and long time delay(LTD) in intermediate frequency(IF) part. Our analysis results show that the proposed scheme reduces the required bits and delay time in RF band of the TTD compared to the conventional single TTD scheme.

Key Words : Beam Squint, Beam Steering, Phased Array Antenna, Phase Shifter, True Time Delay, Wide Band Antenna

1. 서론

유·무인기 탐제형 안테나에 있어, 전기적 빔 조향이 가능한 위상 배열 안테나는 기존 기계적 구동부를 갖는 반사경 안테나 대비 Low-profile 형상으로 구현이 가능하여 유·무인 항공기의 공기항력을 감소할 수 있고, 기계적 구동부 대비 빔 조향을 빠르게 할 수 있는

장점이 있다. 더불어 군사적 목적으로 적 레이더 피탐율(RCS : Radar Cross Section)을 낮출 수 있다.

최근 센서기술의 발달에 의해 유·무인기를 이용한 고정밀 영상정보 획득과 관련한 군사적 운용개념이 증가하고 있다. 이에 대응하여 안테나 동작 대역폭도 광대역화 되고 있다¹⁾.

주파수 대비 일정한 위상정보를 생성하는 일반적인 위상 천이기를 갖는 위상 배열안테나의 경우, 광대역 내, 각 주파수에 따라 빔 편이(Beam squint)현상이 발생한다. 이는 통신품질 저하를 야기하는 문제가

* Corresponding author, E-mail: crazytis@hanmail.net
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

된다^[2].

이와 같은 문제를 해결하기 위해 방사소자의 물리적 배치와 전파의 전파속도에만 직접적인 연관이 있어, 주파수에 영향을 안 받는 실시간 지연(TTD : True Time Delay) 위상 천이기를 이용한 위상 배열 안테나에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다^[3-4].

그러나 고 이득 방사특성을 갖는 위상 배열 안테나의 경우, 다수의 방사소자가 배열되기 때문에 긴 시간 지연이 요구되며, 이는 실시간 지연 선로에 의한 손실 증가요인이 되어 통신품질 저하를 야기하게 된다^[5]. 더불어 긴 시간 지연은 원활한 빔 조향을 위한 실시간 지연 위상 천이기의 분해능(Resolution) 선정에 따른 다수의 시간 지연 제어 회로가 필요하게 되어 실시간 지연 위상 천이기의 면적 및 손실 증가요인이 된다.

본 논문에서는 고 이득 방사특성을 갖는 위상 배열 안테나에 있어, 상기 문제를 해소하고자 실시간 지연 위상 천이기를 STD와 LTD로 이원화하여 구성하는 방안을 제안하였다. 이는 위상 배열안테나를 다수의 Cell 단위로 구분하여 Cell 내부는 RF대역에서 STD로 시간 지연을 수행하고, Cell 단위는 IF 대역에서 LTD로 시간 지연을 수행하는 방법으로, 시간 지연에 따른 손실감소 및 제어회로를 간소화할 수 있다.

실시간 지연 위상 천이기에 관한 상세한 내용은 하위 장에 상세히 기술하였다.

2. 분석용 위상 배열 안테나 설정

실시간 지연 위상 천이기 구성에 따른 특성분석을 위해서는 위상 배열안테나가 필요하다. 본 장에서는 분석용 위상 배열안테나 구성과 이를 바탕으로 한 일반적인 위상 천이기와 실시간 지연 위상 천이기의 특성 차이에 관해 기술하였다.

2.1 분석용 위상 배열 안테나 구조

분석용 위상 배열안테나는 Fig. 1과 같이 ‘ θ ’ 방향으로 $0 \sim 45^\circ$ 범위, ‘ ϕ ’ 방향으로 $0 \sim 360^\circ$ 범위에서 빔 조향이 가능한, x-y 평면에 등간격으로 배열된 16×16 배열 안테나로 설정하였다. 여기서 ‘ d_x ’와 ‘ d_y ’는 x 및 y축 기준 방사소자 간 간격이고, 각 방사소자 내 숫자는 방사소자를 구분하기 위한 표시이다.

배열된 방사소자 수 기준으로 최대 빔 조향 각도에

서 가시 영역(Visible Region) 내 주 빔(Main lobe)를 제외한 그레이팅 로브 영역을 포함하지 않도록 설정하기 위하여 방사소자 간격, 최대 빔 조향 각 그리고 배열된 방사소자 수에 관한 다음 수식을 사용하였다.

$$kd_x + kd_x \sin(\theta_m) \cos(\phi_x) = \frac{(N-1)}{N} 2\pi \quad (1)$$

$$kd_y + kd_y \sin(\theta_m) \sin(\phi_y) = \frac{(M-1)}{M} 2\pi \quad (2)$$

여기서 ‘ k ’는 전파 상수, ‘ θ_m ’는 ‘ θ ’ 방향 최대 빔 조향 각(45°), ‘ N ’은 x 축 상의 최대 배열 수, ‘ M ’은 y축 상의 최대 배열 수 그리고 ‘ ϕ_x ’ 및 ‘ ϕ_y ’는 x 및 y 축을 고려하기 위한 값으로 각각 0° (혹은 180°)와 90° (혹은 270°)이다.

수식 (1), (2)와 상기 설정에 따른 분석용 위상 배열 안테나의 방사 소자 간 간격은 다음과 같이 정리 된다.

$$d_x = \frac{(N-1)\lambda_h}{N[1 + \sin(\theta_m)]} \quad (3)$$

$$d_y = \frac{(M-1)\lambda_h}{M[1 + \sin(\theta_m)]} \quad (4)$$

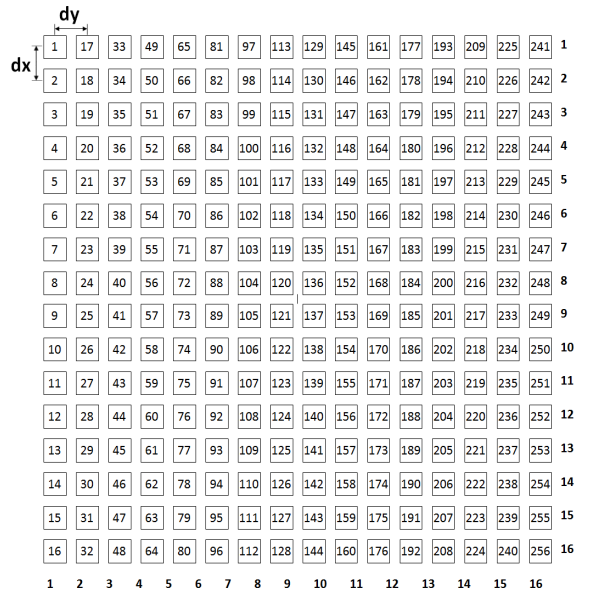


Fig. 1. Geometry of phased array antenna for analysis

여기서 λ_n 는 동작 주파수 대역 내에서 최고 주파수에 관한 파장이다. 본 논문에서 중심 주파수(f_c)는 15 GHz, 동작 대역폭은 1 GHz인 상황을 가정하였다. 본 가정과 수식 (3), (4)에 의한 ' d_x '와 ' d_y '는 각각 10.6219 mm 이다.

2.2 위상 천이기에 따른 빔 편이 현상 분석

위상 배열안테나의 요구 빔 조향각(θ_d, ϕ_d)에 따른 각 방사 소자 별 위상 값은 다음과 같다.

$$phase_x = -kd_x(n-1)\sin(\theta_d)\cos(\phi_d) \quad (5)$$

$$phase_y = -kd_y(m-1)\sin(\theta_d)\sin(\phi_d) \quad (6)$$

$$phase(n_r) = phase_x + phase_y \quad (7)$$

여기서 ' n '과 ' m '은 x 및 y 축상의 방사 배열 수이고, ' n_r '은 (m, n)으로 대응되는 Fig. 1의 방사 소자 표기 숫자이다.

일반적인 위상 천이기의 경우, 주파수 대비 위상 천이 값을 동일하게 변화하도록 설정되어 있다. 위상 배열안테나에 있어, 방사소자 간 이격거리(d_x, d_y)는 물리적으로 고정되어 있으나, 전파상수(k)는 $2\pi/\lambda$ 로 주파수에 관한 함수로 주파수에 따라 변화한다. 따라서 동작 주파수에 따른 요구 지향각(θ_d, ϕ_d)이 변화하면 빔 편이 현상이 발생하게 된다.

반면 실시간 지연 위상 천이기의 경우 전파의 전파속도(빛의 속도)와 물리적으로 고정된 방사소자 간 이격거리에 따른 시간차이를 기준으로 시간 지연하기 때문에 각 요소 별 제어 시간은 주파수에 상관없이 동일하게 산출된다. 따라서 실시간 지연 위상 천이기를 사용할 경우 빔 편이 현상이 발생하지 않게 된다.

위상 배열안테나의 요구 빔 조향각(θ_d, ϕ_d)에 따른 각 방사 소자 별 실시간 지연 값은 다음과 같다.

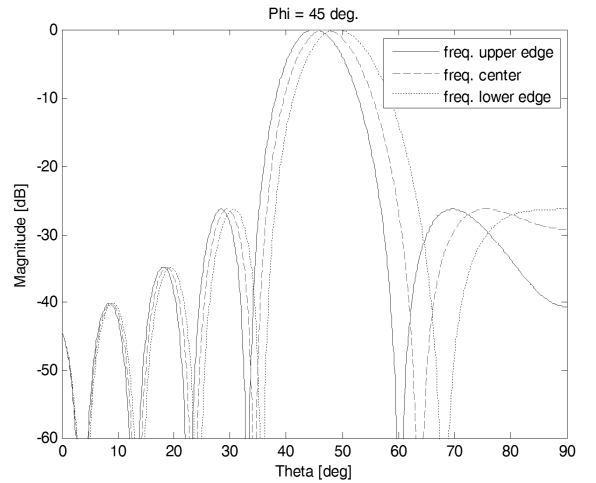
$$\Delta T_x = -d_x(n-1)\sin(\theta_d)\cos(\phi_d)/c \quad (8)$$

$$\Delta T_y = -d_y(m-1)\sin(\theta_d)\sin(\phi_d)/c \quad (9)$$

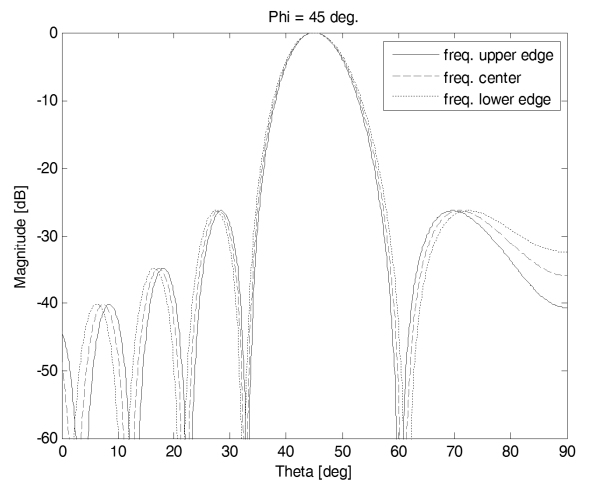
$$\Delta T(n_r) = \Delta T_x + \Delta T_y \quad (10)$$

여기서 ' c '는 전파의 전파속도(빛의 속도)이다.

Fig. 2는 분석용 위상 배열안테나를 기반으로 본 논문에서 가정한 동작 대역폭 내 주요 주파수($f_l = 14.5$ GHz, $f_c = 15.0$ GHz, $f_u = 15.5$ GHz)에서의 일반적인 위상 천이기와 실시간 지연 위상 천이기에 의한 빔 조향 특성을 비교하기 위한 Array Factor(AF) 특성을 나타내었다. 여기서 요구 조향각인 ' θ_d '와 ' ϕ_d '는 각각 45° 로 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 일반적인 위상 천이기를 사용하는 경우 주파수 변화에 따른 빔 편이가 발생되지만, 실시간 지연 위상 천이기를 사용하는 경우 빔 편이가 발생되지 않는다.



(a) General phase shifter



(b) True time delay phase shifter

Fig. 2. Theta plane AF with general PS and TTD

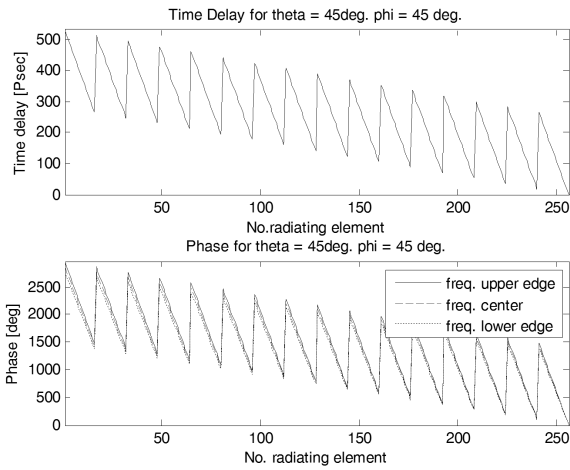


Fig. 3. Time delay and phase characteristics of the TTD

Fig. 3은 Fig. 2(b)의 실시간 지연 위상 천이기에 의한 각 방사소자의 시간 지연을 수식 (11)을 이용하여 위상으로 표현한 것이다.

$$Phase_{TTD}(n_r) = 2\pi f \Delta T(n_r) \tag{11}$$

Fig. 3에서 알 수 있듯이, 주파수에 따라 위상 변화가 다름을 알 수 있다. 즉, 실시간 지연 위상 천이기는 요구 지향 각도를 기준으로 동작 주파수 별 위상 천이를 다르게 발생시킴을 확인할 수 있다.

3. 실시간 지연 위상 천이기 구성

본 장에서는 2장의 분석용 위상 배열안테나와 수식 (10)에 의한 실시간 지연 위상 천이값을 기반으로 실시간 지연 위상 천이기의 구성에 따른 제어 Bit 수 선정 및 AF 특성을 분석하였다.

3.1 실시간 지연 위상 천이기 분해능 설정 기준

실 구현에 의한 실시간 지연 위상 천이값은 Fig. 3과 같이 연속적인 값을 갖지 않고, SIPO(Serial Input Parallel Output)에 의한 제어 Bit 따라 양자화 되어 이산적으로 분포하게 된다. 이에 따라, 이산 분포된 실시간 지연 위상 천이값에 의한 실 지향각(θ_s, ϕ_s)과 요구 지향각(θ_d, ϕ_d) 사이에 차이가 발생하게 된다^[6]. 따라서 원활한 빔 조향을 위해, 요구 지향각과 실 지향각 사

이의 오차를 기준으로 제어 Bit 수에 따른 실시간 지연 위상천이값의 양자화 분해능(Resolution)이 선정되어야 한다.

본 논문에서는 요구 지향각과 실 지향각 사이의 오차는 다음 수식과 같이 두 지향각 사이의 거리 차이 기반 각도 차이로 설정하였다.

$$error_{angle} = 2\sin^{-1}(0.5d_{error}) \tag{12}$$

여기서, ' d_{error} '은 요구 지향각과 실 지향각 사이의 이격거리이다. 오차각 산출을 위한 요구 지향각의 범위는 다음과 같다.

$$0 \leq \theta_d \leq 45^\circ \tag{13-1}$$

$$0 \leq \phi_d \leq 45^\circ \tag{13-2}$$

각 방사소자 별 실시간 지연 위상 천이값은 수식 (8)과 (9)에서 알 수 있듯이 45°를 주기로 반복되기 때문에 ' ϕ_d '의 범위를 수식 (13)과 같이 선정하였다.

본 논문에서 분해능 선정을 위한 오차각은 수식 (13) 범위 내에서 지향 오차각(수식 (12))의 최댓값이 1.0° 이하인 경우로 하였다.

3.2 단일 실시간 지연 위상 천이기

제어 Bit 수에 따른 분해능은 실시간 지연 위상 천이값이 최대가 되는 요구 지향각을 기준으로 산출되어야 한다. 2장에서 설정한 분석용 위상 배열안테나의 경우, $\theta_d = 45^\circ, \phi_d = 45^\circ$ (혹은 $135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$)에서 실시간 지연 위상 천이값이 최대가 된다. 이는 Fig. 3의 1번 방사소자의 ΔT 값으로 531.4595 ps 이다. Table 1은 제어 Bit 수에 따른 분해능을 보여준다.

Table 1. Resolution of TTD with respect to the number of bit

Bit	Resolution [ps]
4	35.4306
5	17.1439
6	8.4359
7	4.1847
8	2.0842

단일 실시간 지연 위상 천이기의 분해능에 따른 각 방사 소자의 이산 분포 실시간 지연 위상 천이값은 수식 (14)와 같이 수식 (10)에 의해 산출된 연속적인 실시간 지연값과의 차이가 최소가 되는 값으로 설정 되도록 하였다.

$$\Delta T_{Bit}(n_r) = \text{round}[\Delta T(n_r)/RES]RES \quad (14)$$

여기서 ΔT_{Bit} 는 제어 Bit에 의해 이산적으로 분포 하는 실시간 지연 위상 천이값, ‘RES’는 분해능 그리고 ‘round’는 반올림을 뜻한다.

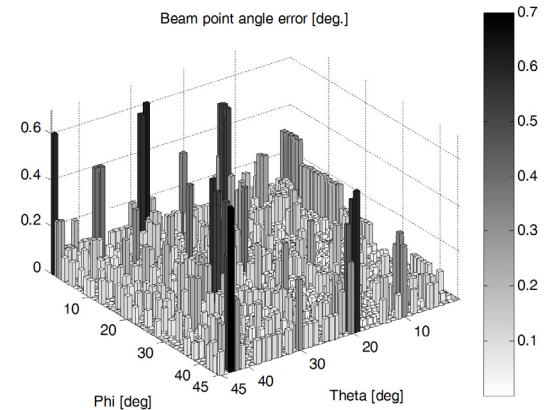
Table 2는 Table 1의 각 분해능에 대응한 수식 (14)에 의해 설정된 실시간 지연 위상 천이값 기준, 수식 (13) 범위 내 수식 (12)의 최댓값이 나오는 요구 지향각, 최댓값 그리고 평균값 결과를 보여준다.

Table 2. Angle error with respect to various single TTD bits

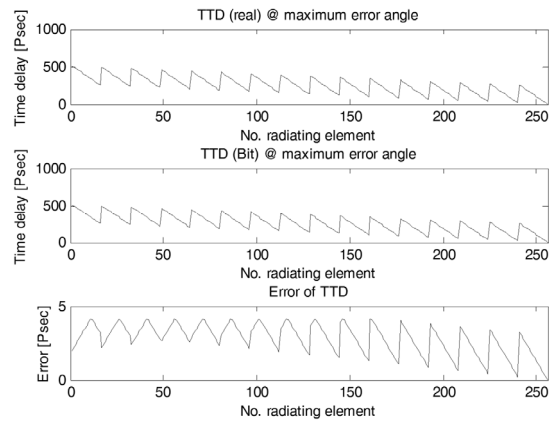
Bit	θ_d	ϕ_d	Max. Angle error	Average Angle error
4	3°	12°	2.32°	0.323°
5	45°	45°	1.60°	0.116°
6	43°	45°	0.70°	0.040°
7	44°	31°	0.41°	0.013°
8	42°	15°	0.13°	0.004°

분석 결과, 오차각 1.0° 이하의 기준을 만족하는 단일 실시간 지연 위상 천이기의 제어 Bit 수는 6 Bit 임을 알 수 있다.

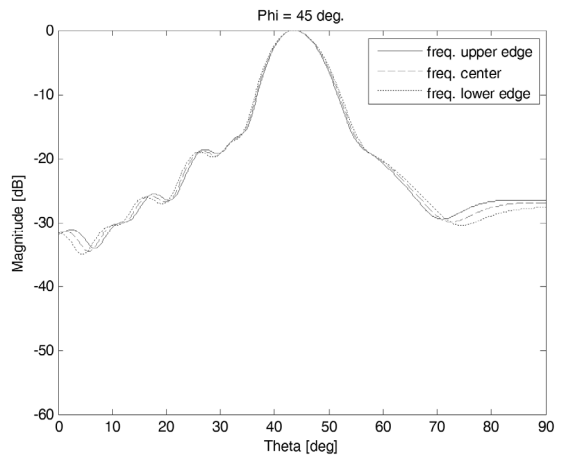
Fig. 4는 제어 Bit 수가 6인 경우의 단일 TTD의 분석 결과를 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 수식 (13) 범위 내 오차각 (수식 (12))을 각도에 대해서 보여주고 있고, Fig. 4(b)는 최대 오차각이 산출된 요구 지향각($\theta_d = 43^\circ$, $\phi_d = 45^\circ$)에서의 실시간 지연 위상 천이값, 이산 분포 실시간 지연 위상 천이값 그리고 둘 사이의 오차값을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 4(c)는 이때의 AF를 보여주고 있다. 분석 결과, 최대 오차각 산출이 산출된 요구 지향각에서, 이산 분포 실시간 지연 위상 천이값에 의한 실 지향각(θ_s , ϕ_s)은 각각 43.7°와 45°임을 확인하였다.



(a) Beam pointing angle error



(b) TTD error



(c) Theta plane AF @ max. error phi

Fig. 4. Performance analysis results of a Single 6 bits TTD phase shifter

3.3 제안된 이중 실시간 지연 위상 천이기

본 논문에서 제안한 이중 실시간 지연 위상 천이기는 Fig. 1의 배열 안테나를 Cell 단위로 구분하여 Cell 내부는 RF대역에서 STD, Cell 단위는 IF 대역에서 LTD로 실시간 지연하는 방안을 제안하였다. Fig. 5는 본 제안 방법에 따라 재 표기한 분석용 위상 배열 안테나를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 Cell은 4x4 방사소자 배열로 하였다.(2장의 설정은 동일하고 구분을 위한 숫자 표기만 변경하였음.)

제어 Bit 수에 따른 STD와 LTD의 분해능은 실시간 지연 위상 천이값이 최대가 되는 요구 지향각을 기준으로, 각각 1번 Cell의 16번 소자($n_r = 52$)와 16번 Cell의 1번 소자($n_r = 205$)의 값을 기반으로 산출되어야 한다. 이에 따른 STD와 LTD의 최대 실시간 지연 위상 천이값은 수식 (10)과 Fig. 3을 통해 각각 106.2919 ps와 425.1676 ps임을 알 수 있다. Table 3은 STD와 LTD 제어 Bit 수에 따른 분해능을 보여준다.

Table 3. Resolution of STD and LTD with respect to the number of bit

Bit	STD resolution [ps]	LTD resolution [ps]
2	35.4306	141.7225
3	15.1845	60.7382
4	7.0861	28.3445
5	3.4287	13.7150

이중 실시간 지연 위상 천이기 중, LTD의 분해능에 따른 각 Cell의 이산 분포 실시간 지연 위상 천이값은 수식 (15)과 같이, 각 Cell 내에서 수식 (10)에 의해 산출된 연속적인 실시간 지연값의 최솟값을 기준으로 내림 연산을 통해 산출되도록 하였다.

$$\Delta T_L(m_c) = \text{floor}[\min(\Delta T(m_c))/RES_L]RES_L \quad (15)$$

여기서 ' m_c '은 Fig. 5의 Cell 표기 숫자, ' RES_L '는 LTD의 분해능, ' \min '은 행렬 내 최솟값 그리고 ' floor '는 내림 연산을 뜻한다.

STD의 실시간 지연 위상 천이값은 (16)과 같이 수식 (15)의 ' ΔT_L '를 참고하여, 수식 (10)의 의해 산출된 연

속적인 실시간 지연값과의 차이가 최소가 되도록 설정하였다.

$$\Delta T_S(m_c, n_c) = \text{round}\left[\frac{\Delta T(m_c, n_c) - \Delta T_L(m_c)}{RES_S}\right]RES_S \quad (16)$$

여기서 ' n_c '는 Fig. 5의 Cell 내부 방사소자의 표기 숫자, ' RES_S '는 STD의 분해능이다.

Table 4는 Table 3의 각 분해능과 이에 대응한 수식 (15) 및 (16)의 이산 분포 실시간 지연 위상 천이값 기준, 수식 (13) 범위 내 수식 (12)의 최댓값이 나오는 요구 지향각, 최댓값 그리고 평균값 결과를 보여준다. (Table 4에서 각 제어 비트 수에 따른 결과, 최대 오차 기준 요구 지향각(θ_d, ϕ_d) / 최댓값 / 평균값 순으로 기술되어 있다.)

분석 결과, 오차각 1.0° 이하의 기준을 만족하는 이중 실시간 지연 위상 천이기의 STD 및 LTD 최소 제어 Bit 수는 각각 4 Bit와 3 Bit 임을 알 수 있다. 즉, 단일 실시간 지연 위상 천이기를 사용하는 경우 보다 이중 실시간 지연 위상 천이기를 사용하는 경우 RF단에서의 제어비트 수는 6 Bit에서 4 Bit로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

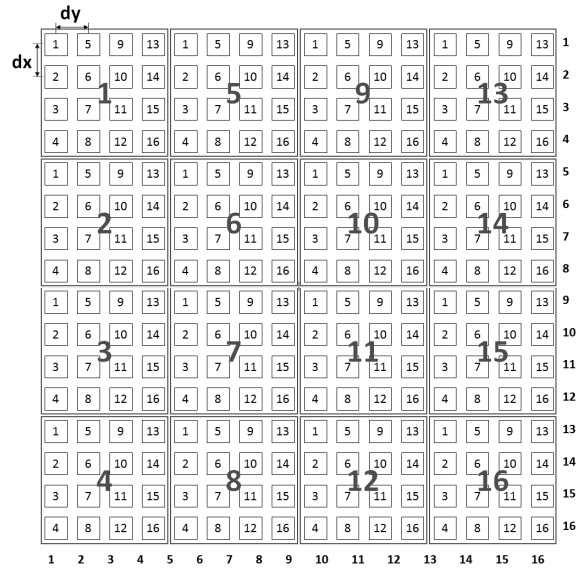


Fig. 5. Geometry of phased array antenna for analyzing dual TTD

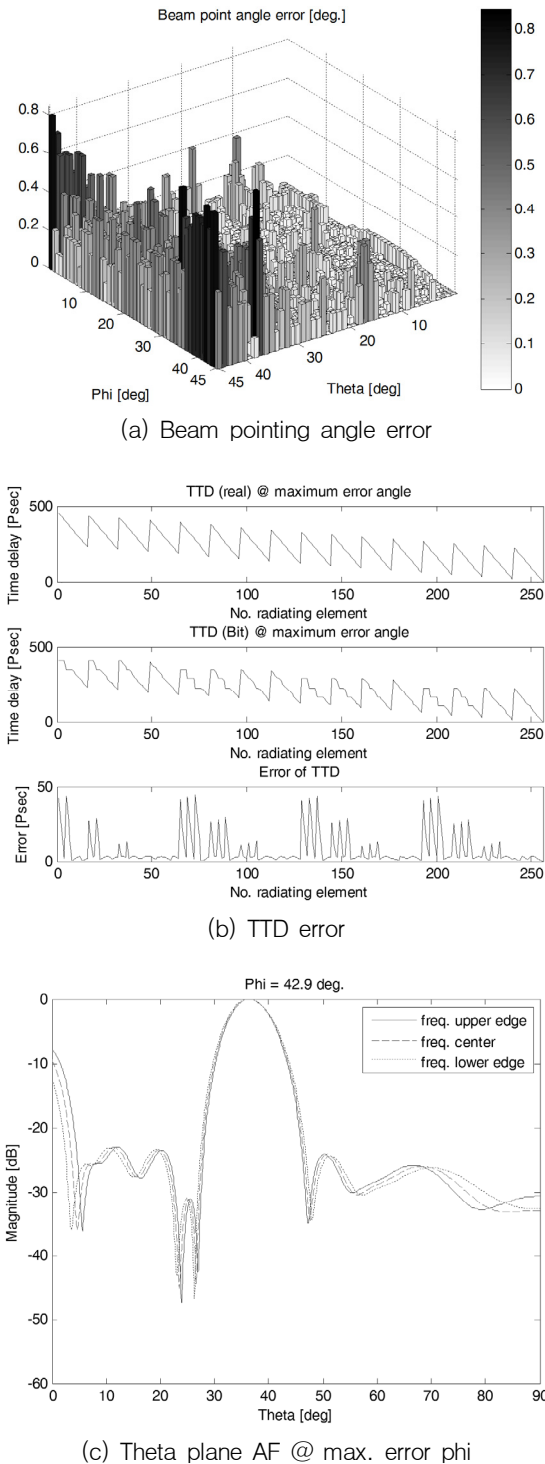


Fig. 6. Performance analysis results of dual TTD phase shifter

Table 4. Angle error with respect to various dual TTD bits

STD	LTD			
	2	3	4	5
3	16°/12°	36°/45°	34°/45°	1°/32°
	4.1044°	1.6°	1.2°	1.1072°
	0.4048°	0.1648°	0.1228°	0.1207°
4	16°/11°	37°/44°	34°/45°	44°/34°
	3.7079°	0.8468°	0.6°	0.5413°
	0.3446°	0.1088°	0.0401°	0.0390°
5	16°/9°	45°/42°	45°/35°	43°/0°
	3.6030°	0.8122°	0.4°	0.3°
	0.3300°	0.0928°	0.0245°	0.013°

Fig. 6은 STD와 LTD 제어 Bit 수가 각각 4 Bit와 3 Bit인 경우, 이중 TTD의 성능 특성을 보여주고 있다. Fig. 6-(a)는 수식 (13) 범위 내 오차각 (수식 (12))을 각도에 대해서 보여주고 있고, Fig. 6-(b)는 최대 오차각이 산출된 요구 지향각($\theta_d = 37^\circ$, $\phi_d = 44^\circ$)에서의 실시간 지연 위상 천이값, 이산 분포 실시간 지연 위상 천이값 그리고 둘 사이의 오차값을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 6-(c)는 이때의 AF를 보여주고 있다. 분석 결과, 최대 오차각 산출이 산출된 요구 지향각에서, 이산 분포 실시간 지연 위상 천이값에 의한 실 지향각(θ_s , ϕ_s)은 각각 36.4° 와 42.9° 임을 확인하였다.

4. 제안된 이중 실시간 지연 위상천이기 분석 결과

위상 배열안테나의 구성 상, 실시간 지연 위상 천이기는 각 방사소자 바로 뒷단에 장착되기 때문에 RF 대역에서 동작한다. 따라서 RF 대역에서 실시간 지연 시간이 길수록 RF 손실은 증가하게 된다. 더불어 실시간 지연 시간이 길수록 시간 지연 경로가 길어지고 원활한 빔조향을 위해 제어 Bit 수를 증가시켜야 한다. 이는 실시간 지연 위상천이기의 구현 면적 증가를 야기하게 되어, 원활한 방사소자 배열을 어렵게 하는 요인이 된다. 그러므로 RF단에서의 최대 지연시간과 제어 Bit수를 줄이는 것이 중요한 회로 설계요소가 된다.

Table 5. Design parameters for single TTD and dual TTD phase shifters

	Single TTD	Dual TTD (Proposed)
Max. Delay time in RF band	531.4595 [ps]	106.2919 [ps] (STD)
Control Bit in RF band	6	4 (STD)
Resolution in RF band	8.4359 [ps]	7.0861 [ps] (STD)

Table 5는 본 논문에서 구성한, 기존 연구된 단일 실시간 지연 위상천이기와 본 논문에서 제안한 이중 실시간 지연 위상천이기의 RF 대역에서 주요 구성 요소 값을 보여준다. 단일 실시간 지연 위상천이기를 사용하는 경우 RF단에서 약 531.4595 ps의 지연시간과 원활한 빔조향을 위하여 6 Bits의 제어회로가 필요하지만 이중 실시간 지연 위상천이기를 사용하는 경우 RF단에서 약 106.2919 ps의 지연시간과 4 Bits 제어회로만이 필요하였다.

본 논문에서 제안한 이중 실시간 지연 위상천이기는 기존 연구된 단일 실시간 지연 위상천이기와 비교하여 RF 대역의 최대 지연 시간과 제어 Bit 수를 줄일 수 있어, RF 손실과 구현 면적을 줄일 수 있는 구조임을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 광대역 통신 기반 고 이득 방사특성을 갖는 위상 배열안테나에 있어, 빔 편이 현상을 없애기 위해 실시간 지연 위상 천이기가 필요함을 확인하였다. 빔 조향 오차각을 기준으로 일반적인 단일 실시간 지연 위상 천이기와 본 논문에서 제안한 이중 실시간 지연 위상 천이기를 구성 및 분석 하였으며, 그 결과 본 논문에서 제안한 이중 실시간 지연 위상 천이기는 RF 대역에서의 최대 지연시간과 제어 Bits 수를 크게 줄일 수 있기 때문에 RF 손실 감소와 제어 회로 간소화에 기여할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 이중 실시간 지연 위상 천이기 구조는 고 이득 방사 특성이 요구되어 다수의 방사소자가 배열된 위상 배열안테나를 사용하는 다양한 응용분야에 적용 가능할 것으로 판단되며, 특히 본 논문의 분석용 위상 배열안테나 보다 많은 방사소자가 배열된 안테나의 경우, 본 논문에서 제안한 이중 실시간 지연 위상 천이기가 더욱 효율적일 것으로 판단된다.

후 기

본 논문에서는 실시간 지연 위상 천이기의 구성을 지향 오차각을 기준으로 기술하였다. 그러나 실시간 지연 위상 천이기를 이용한 위상 배열안테나의 경우 지향각은 정확하나 부엽이 증가하는 현상이 발생한다^[7]. 이와 같은 현상을 포함한 기준 정의 및 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar System," 3rd ed. New York, NY : McGraw-Hill, 2001.
- [2] R. J. Mailoux, "Phased Array Antenna Handbook," Artech House, 2007.
- [3] John S. Kot, Ian M. Davis, Christophe Granet and Greg Pope, "Antenna Concepts for Ka-Band SATCOM on the Move," MILCIS 2009.
- [4] Matt Longbrake, "True Time-Delay Beamsteering for Radar," Aerospace and Electronics Conference, pp. 246-249, 2012.
- [5] John G. Willms, Aziz Ouacha, Lex de Boer, Frank E. Vliet, "A Wideband GaAs 6-Bit True-Time Delay MMIC Employing On-Chip Digital Drivers," Microwave Conference, pp. 1-4, 2000.
- [6] M. Yajima, T. Hasegawa, "Beam Pointing Error of Wideband Planar Phased Array," IEEE International Conference on Communications, pp. 4161-4166, 2006.
- [7] R. J. Mailoux, "Phased Array Theory and Technology," in Proc. IEEE, Vol. 70, No. 3, pp. 246-291, 1982.