Cyclic Difference Set을 이용한 Interleaved Thinned 평면 배열 설계

Design of Interleaved Thinned Planar Arrays Using Cyclic Difference Set

권지나 · 황금철 · 박준영* · 김선주** · 김동환**

Gina Kwon · Keum Cheol Hwang · Joon-Young Park* · Seon-Joo Kim** · Dong-Hwan Kim**

요 약

본 논문에서는 다기능 레이더에 적용 가능한 interleaved thinned 평면 배열 설계 기법을 제안하였다. 제안된 interleaved 평면 배열은 낮은 부엽 준위를 도출하기 위해 cyclic difference set(DS)이 적용된 비주기 부배열로 구성되었다. DS를 이용한 thinned 평면 부배열의 부엽 준위는 DS 파라미터에 의해 예측 가능하므로 부배열 설계에 자기상관 계수(autocorrelation coefficient)가 비슷한 DS와 complementary DS를 적용함으로써 서로 유사한 부엽 준위 특성을 구현하였다. 또한, 두 부배열의 최적 PSL(Peak Sidelobe Level)을 도출하기 위해서 interleaved 평면 배열 설계에 DS의 특성인 cyclic shift를 적용하였다. 최적화된 배열 안테나의 두 부배열은 각각 -12.47 dB와 -10.34 dB로 낮은 PSL 특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, an analytical technique is proposed for the design of interleaved thinned planar array with well-behaved and predictable sidelobes. The interleaved arrays are composed of thinned planar subarrays based on cyclic difference sets(DSs). Because sidelobes of thinned planar subarrays based on DS are predictable by DS parameters, the subarrays exhibit very similar sidelobe levels by utilizing DS and complementary DS with similar autocorrelations each other. The combinatorial method also allows the design of interleaved placements with simultaneously optimum peak sidelobe levels(PSLs) of subarrays using cyclic shift-a property of DSs. The optimized PSLs of the interleaved array are -12.47 dB and -10.34 dB.

Key words : Difference Set, Autocorrelation, Interleaved Thinned Array, Planar Subarray

I. 서 론

최근 함선, 항공기 또는 지상 플랫폼에 탑재되는 레이더들은 탐지, 추적 및 표적 조명과 같은 다수의 기능들이 동시 수행 가능한 다기능 레이더로 발전하

고 있으며, 이에 대한 관심과 수요가 급증하고 있다. 다기능 레이더는 운용 목적에 따라 수 백 혹은 수 천 개의 배열 소자가 수반되는 위상 배열 안테나의 구현이 필수적이다. 이러한 다기능 레이더의 성능 저하 없이 다중 빔을 생성하기 위해, 디지털 빔 형성

동국대학교 전자전기공학부(Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University)

*삼성탈레스(Samsung Thales)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 26, 2012 ; Revised November 19, 2012 ; Accepted November 20, 2012. (ID No. 20121026-120)

· Corresponding Author : Keum Cheol Hwang (e-mail : kchwang@dongguk.edu)

(digital beamforming) 기법이 적용되고 있으나, 배열의 각 소자에 디지털 빔 형성을 적용하면 신호 처리량의 증가로 계산 속도가 저하되는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해, 다수의 배열 소자들을 묶어 부배열을 형성하는 기법이 연구되었다^{[1]~[4]}. 또한, 선형 배열 안테나의 부배열 설계에 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 접목하여 낮은 부엽 준위 특성을 구현하였으며^[3], 이러한 최적화 기법은 부배열 소자들이 서로 교차된 interleaved thinned 선형 배열 설계에도 적용되었다^[4]. 그러나 지금까지 제안된 부배열 설계 기법들은 최적화 기법을 이용하여 확률론적(stochastic)으로 부배열 소자들을 구성하므로, 안테나의 면적이 넓어질 경우 적합하지 않으며 안테나 특성을 예측하기 어렵다. 이를 해결하고자 combinatorial 이론인 cyclic difference set(DS)^[5]을 다기능 레이더용 위상 배열 안테나의 부배열 설계에 적용하였다^{[6][7]}. Cyclic DS는 두 개의 자기상관 계수(auto-correlation coefficient)를 갖는 binary 시퀀스(sequence)이며, 이러한 기법을 이용하여 설계된 thinned 배열은 낮은 예측 가능한 부엽 준위 특성을 나타낸다^[5].

본 논문에서는 cyclic DS를 적용하여 부엽 준위가 낮으면서도 예측 가능한 다기능 interleaved thinned 평면 배열 안테나 설계 기법을 제안한다. 제안하는 interleaved 평면 배열의 두 부배열은 각각 주어진 DS와 이에 해당하는 complementary DS에 의해 비주기적으로 배치되었으며, 두 부배열의 소자들은 서로 교차되어 있다. DS의 cyclic shift 특성을 interleaved 평면 배열 설계에 적용함으로써 두 부배열의 최적 PSL(peak sidelobe level)을 갖는 배열 소자의 위치를 도출하였다. 또한, 두 thinned 평면 부배열의 thinning factor에 따른 부엽 준위 특성을 비교 분석한다.

II. Cyclic Difference Set과 Interleaved Thinned 평면 배열

2-1 Cyclic Difference Set

Cyclic DS는 combinatorial 이론으로 (V, K, λ) 인 세 개의 파라미터로 구성된다. (V, K, λ) -DS는 다음과 같이 unique한 K 개 상수의 집합으로 정의할 수 있다.

$$D = \{d_0, d_1, \dots, d_{K-1}\}, 0 \leq d_i \leq V-1 \quad (1)$$

이러한 DS 원소들에 의해 정의되는 difference α ($1 \leq \alpha \leq V-1$)는 아래와 같으며, 모든 difference α 는 λ 번 나타난다.

$$\alpha = \{(d_i - d_j)_{\text{mod } V}; i \neq j\} \quad (2)$$

여기서 $\text{mod } V$ 는 V 로 나눈 나머지 연산자이다.

(V, K, λ) -DS로부터 0과 1로 구성된 binary 시퀀스를 구할 수 있다.

$$w_V(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n \in D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, 0 \leq n \leq V-1 \quad (3)$$

이러한 DS 기반의 시퀀스를 면적이 $V = V_x \times V_y$ 인 2차원 binary 시퀀스 $w_{V_x V_y}(n, m)$ ($0 \leq n \leq V_x - 1, 0 \leq m \leq V_y - 1$)로 확장할 수 있으며, 자세한 과정은 참고문헌 [5]에서 확인할 수 있다. 이때 2차원 binary 시퀀스의 자기상관 계수는 다음과 같이 두 개의 값으로 유도된다.

$$C(p, q) = \begin{cases} K & \text{if } p_{\text{mod } V_x} = 0 \text{ and } q_{\text{mod } V_y} = 0 \\ \lambda & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

따라서 DS를 thinned 배열 설계에 적용하면 낮은 면에서도 예측 가능한 부엽 준위를 갖는 배열 소자의 위치를 도출할 수 있다.

(V, K, λ) 파라미터를 갖는 DS의 원소들을 shift하여 총 V 개 집합을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_s = \{(d_k + s)_{\text{mod } V}; 0 \leq k \leq K-1\} \\ 0 \leq s \leq V-1 \quad (5)$$

이 집합들도 파라미터 (V, K, λ) 로 정의되고, 이러한 DS의 특성을 cyclic shift라 한다. 또한, (V_p, K_p, λ_p) -DS가 주어지면 이에 해당하는 complementary DS(CDS)는 아래와 같은 관계에 의해 정의되며, CDS 또한 DS의 특성을 만족한다.

$$V_C = V_I \quad (6)$$

$$K_C = V_I - K_I \quad (7)$$

$$\lambda_C = V_I - 2K_I + \lambda_I \quad (8)$$

2-2 Interleaved Thinned 평면 배열

Cyclic DS를 적용하여 배열 소자들의 간격이 반파장인 균일 격자(uniform lattice)에 설계된 thinned 평면 배열의 빔 패턴은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$f(u, v) = \sum_{n=0}^{V_x-1} \sum_{m=0}^{V_y-1} w_{V_x V_y}(n, m) e^{j\pi(nu + mv)} \quad (9)$$

여기서 $w_{V_x V_y}(n, m)$ 는 (V, K, A) -DS 기반의 2차원 binary 시퀀스로써 배열 소자 가중치를 나타내고, $u = \sin\theta \cos\phi$, $v = \sin\theta \sin\phi$ 이다. 이러한 DS 기반의 배열 안테나의 면적은 $V = V_x \times V_y$ 이며, thinning factor는 K/V 로 정의된다. 또한, 부엽 영역에서의 PSL은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PSL = \max_{(u, v) \in S} \left[\frac{f(u, v)}{\max_{(u, v) \in S} f(u, v)} \right] \quad (10)$$

여기서 S 는 부엽 영역이다.

이를 바탕으로, interleaved 평면 배열은 DS의 complementary 특성을 적용하여 설계되었다. 그림 1은 $(63, 32, 16)$ -DS(D_I)^[5]와 이에 해당하는 $(63, 31, 15)$ -CDS(D_C)를 이용하여 설계된 interleaved thinned 평면 배열 구조를 보여주고 있다. D_I 와 D_C 의 빔 패턴은 각각 (9)의 배열 소자 가중치를 $w_{V_x V_y}^I(n, m)$ 와 $w_{V_x V_y}^C(n, m)$ 으로 대입하여 유도할 수 있다. 또한, cyclic shift 특성을 이용하여 구현 가능한 V 개 DS와 CDS 중 두 부배열의 PSL이 최소값을 갖는 최적 set의 shift를 아래와 같이 선택함으로써 배열 소자의 위치를 효과적으로 도출하였다.

그림 1. $(63, 32, 16)$ -DS를 이용하여 설계된 interleaved thinned 평면 배열 구조

Fig. 1. Geometry of the interleaved thinned planar array using $(63, 32, 16)$ -DS.

$$\sigma^{OPT} = \arg\{\min_{\sigma} [PSL(D_I^{(\sigma)}) + PSL(D_C^{(\sigma)})]\} \quad (11)$$

DS에 근거하여 설계된 두 부배열의 빔 패턴은 배열 면적($V = V_I = V_C$), 두 부배열의 소자 개수(K_I, K_C) 그리고 자기상관 계수(K_I, A_I, K_C, A_C)에만 영향을 받기 때문에 그 특성이 예측 가능하다^[5].

III. 설계 결과

그림 2는 $(63, 32, 16)$ -DS와 이에 해당하는 complementary DS의 자기상관 함수를 보여주고 있다. 상보적 관계인 두 DS의 thinning factor가 비슷하므로 자기상관 계수가 $K_I=32 \simeq K_C=31$ 와 $A_I=16 \simeq A_C=15$ 으로 거의 동일함을 알 수 있다. 이 특성은 그림 3에서 확인할 수 있듯이 자기상관 계수가 비슷한 두 thinned 평면 부배열의 PSL이 서로 유사하다는 것을 보여준다. 이러한 부엽 준위의 유사한 특성은 DS를 접목한 thinned 배열 안테나의 빔 패턴이 DS 파라미터에 의해서만 결정되기 때문에 나타난다. 또한, 그림 3은 DS의 cyclic shift 특성을 이용하여 각각 V 개씩 구현 가능한 두 부배열의 PSL을 보여주고 있다. Shift되지 않은 두 부배열의 PSL은 $PSL_I = -8.41$ dB, $PSL_C = -10.67$ dB이고, cyclic shift를 식 (11)과 같이 적용하여 구한 최적 PSL은 $\sigma^{OPT}=32$ 일 때 각각 $PSL_I^{OPT} = -12.47$ dB, $PSL_C^{OPT} = -10.34$ dB이다. 하지만 $\sigma_I^{OPT} \neq \sigma_C^{OPT}$ 이기 때문에 식 (11)을 만족하는 최적 shift는 DS와 CDS의 각각 최소값을 유도하지 않고 두 부배열의 PSL을 동시에 최소화하는 형태로 결정된다. 이

그림 2. $(63, 32, 16)$ -DS와 CDS의 자기상관 함수

Fig. 2. Autocorrelations of $(63, 32, 16)$ -DS and CDS.

그림 3. (63, 32, 16)-DS와 CDS를 이용한 V 개 interleaved 평면 배열의 PSL

Fig. 3. PSLs of V -interleaved planar arrays using (63, 32, 16)-DS and CDS.

그림 4. (63, 32, 16)-DS와 CDS 기반의 interleaved thinned 평면 배열의 최적 위치

Fig. 4. Optimized geometry of the interleaved thinned planar array based on (63, 32, 16)-DS and CDS.

과정에서 최적화 기법을 고려하지 않았기 때문에 두 부배열의 PSL이 동시에 최적값을 갖는 interleaved thinned 평면 배열을 설계하는데 시간을 단축할 수 있었다.

그림 4는 (63, 32, 16)-DS와 (63, 31, 15)-CDS를 이용하여 두 부배열이 최소 PSL을 갖는 interleaved thinned 평면 배열의 위치를 보여주고 있다. 비주기적으로 구성된 두 부배열의 배열 소자들이 서로 교차되어 있음을 확인할 수 있다. 그림 5는 최소 PSL을 갖는 interleaved 평면 배열에서 (63, 32, 16)-DS를 이용하여 설계된 부배열의 빔 패턴이다. 그림 5(a)의

3차원 패턴에서 볼 수 있듯이 최적 PSL은 -12.47 dB이며, 그림 5(b)는 $\phi=0^\circ$, $\phi=90^\circ$ 일 때 2차원 패턴을 보여준다. 이에 해당하는 complementary DS의 3차원 빔 패턴과 2차원 빔 패턴은 그림 6에 나타내었으며, 최적 PSL은 -10.34 dB이다. 앞에서 언급했듯이, DS 기반으로 설계된 두 부배열의 빔 패턴은 배열 면적, 두 부배열 소자 개수, 그리고 자기상관 계수에만 영향을 받기 때문에 두 부배열의 부엽 준위(그림 5와 그림 6)가 유사하게 나타난다.

이와 반대로 자기상관 계수가 서로 다른 DS와 CDS를 이용하여 설계된 interleaved thinned 평면 배

그림 5. (63, 32, 16)-DS를 이용한 최적 부배열의 normalized 빔 패턴

Fig. 5. Normalized radiation pattern of the optimized subarray using (63, 32, 16)-DS.

(a) 3차원 패턴
(a) Three dimensional pattern

(b) 2차원 패턴 ($\phi = 0^\circ, \phi = 90^\circ$)
(b) Two dimensional pattern ($\phi = 0^\circ, \phi = 90^\circ$)

그림 6. (63, 31, 15)-CDS를 이용한 최적 부배열의 normalized 빔 패턴

Fig. 6. Normalized radiation pattern of the optimized subarray using (63, 31, 15)-CDS.

열의 부엽 준위를 분석하였다. 그림 7은 (91, 10, 1)-DS^[8]와 이에 해당하는 (91, 81, 72)-CDS의 자기상관 함수를 보여주고 있다. 두 DS의 thinning factor가 다르므로 shift에 따른 자기상관 계수 값의 차이($\Delta = 71$)가 크다. (63, 32, 16)-DS의 경우와 다르게 자기상관 계수가 서로 다르므로 두 부배열의 최적 PSL은 $PSL_I^{OPT} = -5.34$ dB와 $PSL_C^{OPT} = -13.09$ dB로 약 8 dB 정도 차이가 있음을 그림 8에서 확인할 수 있다. 하지만 (91, 10, 1)-DS에도 cyclic shift 특성을 적용하여 shift되지 않은 두 부배열의 PSL인 $PSL_I = -4.7$ dB와 $PSL_C = -11.59$ dB보다 약 1.5 dB씩 감소된 최

그림 7. (91, 10, 1)-DS와 CDS의 자기상관 함수

Fig. 7. Autocorrelations of (91, 10, 1)-DS and CDS.

그림 8. (91, 10, 1)-DS와 CDS를 이용한 V개 interleaved 평면 배열의 PSL

Fig. 8. PSLs of V-interleaved planar arrays using (91, 10, 1)-DS and CDS.

적 PSL을 효과적으로 도출하였다.

그림 9는 두 부배열의 PSL이 동시에 최소값을 갖는 shift가 $\sigma^{OPT} = 42$ 일 때, (91, 10, 1)-DS에 근거한 interleaved thinned 평면 배열의 위치를 보여준다. (63, 32, 16)-DS와 마찬가지로 부배열의 배열 소자들이 교차되어 있지만 배열 소자 개수의 차이가 있다. 그림 10과 11은 각각 $\sigma^{OPT} = 42$ 일 때 (91, 10, 1)-DS와 (91, 81, 72)-CDS의 빔 패턴이다. 자기상관 계수가 서로 다른 DS와 CDS의 빔 패턴을 비교 분석하면 부엽 준위가 상이한 것을 알 수 있는데, DS 기반의 thinned 배열의 부엽준위는 DS 파라미터에 의해 결정되기 때문이다.

그림 9. (91, 10, 1)-DS와 CDS 기반의 interleaved thinned 평면 배열의 최적 위치

Fig. 9. Optimized geometry of the interleaved thinned planar array based on (91, 10, 1)-DS and CDS.

(a) 3차원 패턴

(a) Three dimensional pattern

(a) 3차원 패턴

(a) Three dimensional pattern

(b) 2차원 패턴 ($\phi = 0^\circ, \phi = 90^\circ$)

(b) Two dimensional pattern ($\phi = 0^\circ, \phi = 90^\circ$)

그림 11. (91, 81, 72)-CDS를 이용한 최적 부배열의 normalized 빔 패턴

Fig. 11. Normalized radiation pattern of the optimized subarray using (91, 81, 72)-CDS.

IV. 결 론

본 논문에서는 DS와 이에 해당하는 complementary DS에 근거하여 낮으면서도 예측 가능한 부엽준위 구현을 위한 interleaved thinned 평면 배열 안테나 설계 기법을 제안하였다. DS의 cyclic shift 특성을 이용하여 최적화 과정을 거치지 않고 두 부배열의 최적 PSL을 도출하였으며, 각각 -12.47 dB와 -10.34 dB의 낮은 PSL 특성을 보여줄을 확인하였다. 또한 DS를 접목한 배열의 부엽 준위는 DS 파라미터에 의해 결정되므로, 자기상관 계수가 비슷한 DS를 선택

(b) 2차원 패턴 ($\phi = 0^\circ, \phi = 90^\circ$)

(b) Two dimensional pattern ($\phi = 0^\circ, \phi = 90^\circ$)

그림 10. (91, 10, 1)-DS를 이용한 최적 부배열의 normalized 빔 패턴

Fig. 10. Normalized radiation pattern of the optimized subarray using (91, 10, 1)-DS.

함으로써 부배열의 부엽 준위가 서로 유사한 interleaved thinned 평면 배열 안테나를 구현하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 interleaved thinned 배열 설계 기법은 다기능 위상 배열 레이더용 안테나 설계 분야에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. L. Haupt, *Antenna Arrays: A Computational Approach*, Hoboken, NJ: Wiley, pp. 197-203, 2010.
- [2] J. E. Boyns, J. H. Provencher, "Experimental results of a multifrequency array antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-20, no. 1, pp. 106-107, Jan. 1972.
- [3] 김준호, 김두수, 김선주, 양훈기, 천창율, 정용식, "선형 배열 안테나에서 수정된 유전 알고리즘을 이용한 부배열 구조 최적화", *한국전자과학회 논문지*, 23(2), pp. 187-195, 2012년 2월.
- [4] R. L. Haupt, "Interleaved thinned linear arrays", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 9, pp. 2858-2864, Sep. 2005.
- [5] D. G. Leeper, "Isophoric arrays-massively thinned phased arrays with well-controlled sidelobes", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 12, pp. 1825-1835, Dec. 1999.
- [6] G. Oliveri, P. Rocca, and A. Massa, "Interleaved linear arrays with difference sets", *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 5, pp. 323-324, Mar. 2010.
- [7] C. I. Coman, I. E. Lager, and L. P. Ligthart, "Multifunction antennas-the interleaved sparse sub-arrays approach", *Proc. 36th European Microwave Conference-EuMC*, Manchester, UK, pp. 1794-1797, Sep. 2006.
- [8] D. M. Gordon, La Jolla Difference Set Repository, [online]. Available: http://www.ccrwest.org/diffsets/diff_sets/index.html

권 지 나

2012년 2월: 동국대학교 전자전기공학부 (공학사)
2012년 3월~현재: 동국대학교 전자전기공학부 석사과정
[주 관심분야] 위상 배열 안테나

황 금 철

2001년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학석사)
2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학박사)
2006년 1월~2008년 7월: 삼성탈레스 기술연구소 책임연구원
2008년 9월~현재: 동국대학교 전자전기공학부 부교수
[주 관심분야] 전자파 복사 및 산란해석, 통신 및 레이더 안테나, 최적화 알고리즘 등

박 준 영

1997년 2월: 동아대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 2월~2002년 7월: (주)감마
누부설연구소 선임연구원
2002년 8월~현재: 삼성탈레스(주)

레이더연구소 미래기술그룹 전문연구원
[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계, 전자파 복사 및 산란 해석, 안테나 등

김 동 환

2005년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 2월~현재: 국방과학연구소
선임연구원
[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계, 자원관리 알고리즘 등

김 선 주

1986년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 3월~현재: 국방과학연구소
책임연구원

[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계, 항공기 레이더