

# 최적 상호상관을 갖는 소나배열 쌍의 생성에 관한 연구

학생회원 김정헌\*, 어창현\*\*, 홍윤표\* 정회원 송홍엽\*

## On the construction of pairs of sonar arrays with optimum cross-correlation

Jeong-Heon Kim\*, Chang-Hyun Eo\*\*, Yun-Pyo Hong\* *Student Members*

Hong-Yeop Song\* *Regular Member*

### 요약

본 논문은 최적 상호상관 특성을 갖는 소나배열 쌍의 대수학적 생성방법을 제시한다. 이 생성방법은 최상의 소나배열 쌍은 주어진 행의 크기에 대해 가장 큰 열의 크기를 갖는다는 관점에서 최상의 소나배열 쌍을 찾기 위해 알려진 모든 모듈라 소나배열에 적용되어진다.

### ABSTRACT

This paper proposes an algebraic construction method of pairs of sonar arrays with optimum cross-correlation. The method is applied to all the known algebraically constructed modular sonar arrays to find best pairs of sonar arrays in the sense that they have the biggest column size given row size.

### 1. 서론

동기 펄스방식 레이더 시스템이나 능동 소나 시스템에서, 반사되어 돌아오는 신호는 원래 신호에서 시간천이와 주파수천이가 발생한 형태이다. 일반적으로, 시간천이는 목표물까지의 거리에 대응되고 주파수천이는 시스템과 목표물과의 상대 속도에 대응된다. 보다 나은 성능을 위해서 시스템은 비동기 위상 비주기 자기상관 특성이 좋은 2차원 패턴을 요구한다. 그러한 2차원 패턴을 소나배열이라 하며<sup>[1]</sup>,<sup>[3]</sup> 다음과 같이 정의한다.

**정의 1.**  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  이라 하자.  $m \times n$  소나배열  $f$  는  $1 \leq h \leq n-1$ ,  $1 \leq i, j \leq n-h$ 인 모든 정수  $h, i, j$  에 대해 아래 조건을 만족하는  $f: N \rightarrow M$  함수이다.

$$f(i+h) - f(i) = f(j+h) - f(j) \Leftrightarrow i=j$$

어떠한 응용에서는 이와는 약간 다른 모듈라 소나배열이 필요하게 되며, 아래와 같이 정의된다.

**정의 2.**  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  이라 하자.  $m \times n$  모듈라 소나배열  $f$  는  $1 \leq h \leq n-1$ ,  $1 \leq i, j \leq n-h$ 인 모든 정수  $h, i, j$  에 대해 아래 조건을 만족하는  $f: N \rightarrow M$  함수이다.

$$f(i+h) - f(i) = f(j+h) - f(j) \pmod{m} \Leftrightarrow i=j$$

많은 레이더/소나 시스템은 같은 주파수 대역을 사용하기 때문에, 다중사용자 레이더/소나 시스템의 성능은 레이더 신호들간의 간섭에 의존한다<sup>[6]</sup>. 이런 경우에는 소나배열의 자기상관뿐만 아니라 소나배열

\* 연세대학교 전기전자공학과 부호 및 정보이론 연구실(heon@eve.yonsei.ac.kr),

\*\* LG전자 디지털 미디어 연구소 NSIS Team(sleepy@lge.com)

논문번호 : 00313-0804, 접수일자 : 2000년 8월 4일

※ 본 논문은 BK21 연구지원 사업의 결과입니다.

들간의 비주기 상호상관 특성도 고려되어야만 한다.

최적 상호상관 특성을 가지는 소나배열 쌍은 두 개의 레이더/소나 시스템이 거의 간섭 없이 같은 주파수 대역에서 동작하는 것을 가능하게 하며<sup>[5]</sup>, 이러한 소나배열 쌍이 본 논문의 주요 관심사이다.

그림 1은 2개의 소나배열과 그것의 2차원 비주기 상호상관 특성을 보여준다. 그림 1의 2차원 비주기 상호상관 그림에서의 숫자는 서로 겹치는 점의 수를 표시하고 빈칸은 겹치는 점이 없다는 것을 의미한다. 상호상관 함수의 최대값은 1이다. 이것이 바로 최적 상호상관 특성이며, 이는 두 개의  $m \times n$  소나배열  $f$  와  $g$  에서  $1 \leq h < n, 1 \leq i, j \leq n-h$ 를 만족하는 정수  $h, i, j$  에 대해 아래의 식이 성립한다는 것을 의미한다.

$$f(i+h) - f(i) \neq g(j+h) - g(j) \quad (1)$$

소나배열 집합에 대하여 두 가지 문제가 존재할 수 있다. : (1) 최적상관을 가지는 소나배열 쌍이 얼마나 많이 존재하는가. (2) 고정된  $m$  에 대하여,  $n$ 이 얼마나 커질 수 있는가. 여기서 우리는 단지 소나배열 쌍만 고려하기 때문에 (2)번 문제에만 관심을 기울인다. 본 논문에서는 최적 상호상관 특성을 갖는 소나배열 쌍의 대수학적 생성 방법을 제안한다.

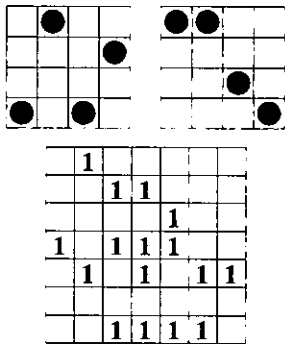


그림 1. 최적상호상관 특성을 갖는 소나배열 쌍

## II. 최적 상호상관 특성을 갖는 소나배열 쌍의 생성

다음의 정리에 의해, 주어진 소나배열에서 최적 상호상관 특성을 갖는 소나배열 쌍을 쉽게 얻을 수 있다.

**정리 3.**  $f$  를  $m \times n$  소나배열이라하자( $n$ 은 짝수). 그렇다면 다음에 나오는  $g_A$  와  $g_B$  는 최적 상호

상관 특성을 갖는 소나배열 쌍이다.

- Middle-cut :  $f$  를 중간에서 나눈다.

$$\begin{cases} g_A = f(i) \\ g_B = f(i + \frac{n}{2}) \end{cases} \text{ for } i = 1, \dots, \frac{n}{2} \quad (2)$$

- Shuffling : 홀수 열과 짝수 열을 따로따로 모은다.

$$\begin{cases} g_A = f(2i) \\ g_B = f(2i-1) \end{cases} \text{ for } i = 1, \dots, \frac{n}{2} \quad (3)$$

**증명.**  $f(i)$  는 소나배열이므로

$$f(i+h) - f(i) = f(j+h) - f(j) \Leftrightarrow i=j \quad (4)$$

위의 조건에 의해, Middle-cut으로 만들어진 소나배열 쌍은 최적 상호상관 특성을 갖는다는 것이 명백하다. 이제 Shuffling으로 만들어진  $g_A$  와  $g_B$  가 최적 상호상관특성을 갖는다는 것을 증명해보도록 하자. 우선 (3)식에 의해 주어진  $g_A$  와  $g_B$  에 대해

$g_A(i+h) - g_A(i) = g_B(j+h) - g_B(j)$  임을 가정하자.

그렇다면,

$$\begin{aligned} g_A(i+h) - g_A(i) &= g_B(j+h) - g_B(j) \\ \Leftrightarrow f(2i+2h) - f(2i) &= f(2j+2h-1) - f(2j-1) \\ \Leftrightarrow f(2i+2h) - f(2i) &= f(2j-1+2h) - f(2j-1) \\ &\Leftrightarrow 2i = 2j-1 \end{aligned} \quad (5)$$

그러나  $i$ 와  $j$ 는 모두 정수이므로 이는 불가능하다. 그러므로  $g_A$ 와  $g_B$ 는 최적 상호상관 특성을 갖는다.

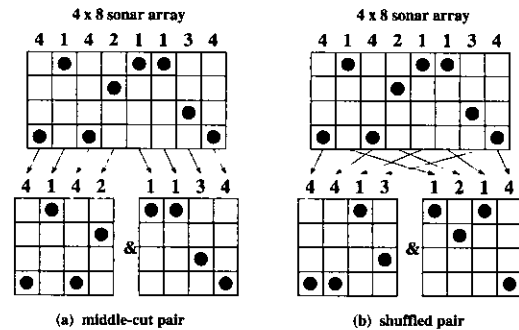


그림 2. 주어진 소나배열과 그것을 두 부분으로 나누는 두 가지 방법

[7]에서 보인바와 같이,  $f$  가  $m \times n$  소나배열이고  $u$ 는  $m$ 과 서로 소인 모듈라  $m$ 의 원소이면,

$g(i) = uf(i) + si + a$  로 정의되는  $g$  또한  $m \times n$  소나배열이다. 이러한 변환은(정리 3과 연관지어서) 최적 상호상관 특성을 갖는 보다 좋은 소나배열 쌍을 찾는 데에 이용될 수 있다. 다시 말해서,  $u$ 가  $m$ 과 서로 소인 모듈라  $m$ 의 원소이고  $s, a_A, a_B$ 가 모듈라  $m$ 의 임의의 원소라 하면, 아래의 식들로 정의되는 소나배열  $g_A$  와  $g_B$  는 최적 상호상관 특성을 갖는다.

**A. Shuffling**

주어진  $m \times n$  소나배열  $f$  에 대해서,

1.  $n$ 이 짝수일 경우

$$\begin{cases} g_A(i) = uf(2i) + s(2i) + a_A \\ g_B = uf(2i-1) + s(2i-1) + a_B \end{cases} \text{for } i=1, \dots, \frac{n}{2} \quad (6)$$

2.  $n$ 이 홀수일 경우

• 맨 오른쪽 열을 없애고 Shuffling할 경우

$$\begin{cases} g_A(i) = uf(2i) + s(2i) + a_A \\ g_B = uf(2i-1) + s(2i-1) + a_B \end{cases} \text{for } i=1, \dots, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \quad (7)$$

• 맨 왼쪽 열을 없애고 Shuffling할 경우

$$\begin{cases} g_A(i) = uf(2i) + s(2i) + a_A \\ g_B = uf(2i+1) + s(2i+1) + a_B \end{cases} \text{for } i=1, \dots, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \quad (8)$$

**B. Middle-cutting**

주어진  $m \times n$  소나배열  $f$  에 대해서

1.  $n$ 이 짝수일 경우

$$\begin{cases} g_A(i) = uf(i) + s(i) + a_A \\ g_B = uf(i + \frac{n}{2}) + s(i + \frac{n}{2}) + a_B \end{cases} \text{for } i=1, \dots, \frac{n}{2} \quad (9)$$

2.  $n$ 이 홀수인 경우(가운데 열은 왼쪽과 오른쪽의 소나배열에 모두 포함되어진다.)

$$\begin{cases} g_A(i) = uf(i) + s(i) + a_A \\ g_B = uf(i + \lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + s(i + \lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + a_B \end{cases} \text{for } i=1, \dots, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \quad (10)$$

각각의  $u, s$  에 대하여, 맨 아래부터 연속된 비어있는 행을 갖는  $g_A$  와  $g_B$  를 생성하는  $a_A$  와  $a_B$  를 찾을 수 있고 이는 최상의 소나배열 쌍을

이룬다. 그러므로 어떤 소나배열이 주어지면  $u, s, a_A, a_B$  를 적절히 선택하여 최상의 소나배열 쌍을 구할 수 있다.

**III. 탐색 범위의 축소**

위에서 제안한 방법은 대수학적으로 생성된 알려진 모든 모듈라 소나배열에 적용될 수 있다. 각각의  $m \times n$  소나배열에 대하여,  $u, s, a_A, a_B$  의 선택에 대응되는 수많은 소나배열 쌍이 존재하며 이러한 모든 소나배열 쌍에 대한 탐색은 사실상 불가능하다. 그러나 다행스럽게도 다음에 이어지는 이유들에 의해 각각의 소나배열 생성방법에 대한 탐색 범위를 축소시킬 수 있다.

**A. Logarithmic Welch method<sup>[2]</sup>**

$\alpha$ 를  $GF(p)$ 의 원시원소라 하자( $p$ 는 소수). 그러면  $f(i) = \log_{\alpha} i$  로 정의되는 함수  $f: \{1, 2, \dots, p-1\} \rightarrow \{1, 2, \dots, p-1\}$  는  $(p-1) \times (p-1)$  모듈라 소나배열이 된다. 모든 logarithmic 모듈라 소나배열의 생성을 고려하기 위해서는 모든 원시원소  $\alpha$ 를 고려해야만 한다.  $\gamma$ 를  $GF(p)$ 의 임의의 원시원소라고 하고,  $\alpha = \gamma^k, \gcd(k, p-1) = 1$  이라 하면,

$$f(i) = \log_{\gamma^k} i = k^{-1} \log_{\gamma} i \quad (11)$$

$$kf(i) = \log_{\gamma} i \quad (12)$$

위와 같이  $\log_{\gamma} i$  로 정의되는 소나배열은  $f(i)$ 에  $k$ 를 곱한 형태이므로 단지 하나의 원시원소만 고려하면 된다.

**B. Extended exponential Welch method<sup>[2],[3]</sup>**

$\alpha$ 를  $GF(p)$ 의 원시원소,  $r$ 을 임의의 정수라 하자( $p$ 는 소수). 그러면  $f(i) = \alpha^{i+r}$  로 정의되는 함수  $f: \{0, 1, \dots, p-1\} \rightarrow \{1, 2, \dots, p\}$  는  $p \times p$  모듈라 소나배열이 된다. 모든 extended exponential Welch 모듈라 소나배열 생성을 고려하기 위해서는 모든 원시원소  $\alpha$ 와 모든  $r(r=0, 1, \dots, p-1)$ 를 고려해야만 한다.  $0$ 이 아닌 임의의  $r$ 에 대해 다음 식이 성립한다.

$$f(i) = \alpha^{i+r} = \alpha^r \alpha^i = k \alpha^i \quad \gcd(k, p) = 1 \quad (13)$$

위 식에서  $f(i)$ 는  $r=0$  일 때 얻어지는 소나배열에  $k$ 를 곱한 형태이다. 그러므로 단지  $r=0$ 인 경우만 고려하면 된다.

C. Quadratic method<sup>(8)</sup>

$d, b, c$ 는  $\gcd(d, p)=1$  을 만족하는 정수 상수이고  $p$ 는 소수라 하자. 그러면 아래와 같이 정의되는 함수  $f: \{1, 2, \dots, p+1\} \rightarrow \{1, 2, \dots, p\}$  는  $p \times (p+1)$  모듈라 소나배열이다.

$$f(i) = di^2 + bi + c \quad (14)$$

위 식에서  $f(i)$  는  $u=d, s=b, a=c$  인  $g(i) = i^2$  의 변환형태이다. 그러므로  $d=1, b=0, c=0$  인 경우만 고려하면 된다. 즉,  $f(i) = i^2$  만 고려하면 충분하다.

D. Golomb method<sup>(2),(4)</sup>

$q$  ( $q \geq 2$ )를 소수의 제곱수라 하고,  $\alpha, \beta$ 를  $GF(q)$ 의 원시원소라 하자. 그러면  $f(i) = j \Leftrightarrow \alpha^i + \beta^j = 1$  로 정의되는 함수  $f: \{1, 2, \dots, q-2\} \rightarrow \{1, 2, \dots, q-1\}$  는  $(q-1) \times (q-2)$  소나배열이 된다.  $\gamma$ 를  $GF(q)$ 의 원시원소,  $\alpha = \gamma^x, \beta = \gamma^y$  라 하자 ( $x, y$ 는 임의의 수).  $g(i) = j \Leftrightarrow (\gamma^x)^i + \gamma^y = 1$  로  $g(i)$ 를 정의하면  $g(i) = yf(i), \gcd(y, q-1) = 1$  이다. 그러므로 단지 두 개의 원시원소만 고려하면 된다.

E. Shift sequence method<sup>(9)</sup>

$p$ 는 소수,  $\alpha$ 를  $GF(p^{2r})$ 의 원시원소,  $\beta$ 를  $GF(p^r)$ 의 원시원소라 하자. 그러면 아래와 같이 정의되는  $f(i)$  는  $(p^r-1) \times p^r$  모듈라 소나배열이 된다.

$$\begin{aligned} f(i) &= \log_{\beta}((\alpha^i)^{p^r} + \alpha^i) \\ &= \log_{\beta} \left[ \text{tr}_{GF(p^{2r})}^{GF(p^r)}(\alpha^i) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$\alpha$ 는  $GF(p^{2r})$ 의 원시원소이므로  $\text{ord}(\alpha^{p^r+1}) = p^r - 1$  를 만족하고, 그러므로  $\alpha^{p^r+1}$  은  $GF(p^r)$ 의 원시원소이다. 그렇다면 어떤  $k$ 에 대해  $\beta = (\alpha^{p^r+1})^k, \gcd(k, p^r-1) = 1$  를 만족한다.

$$\begin{aligned} &\log_{\beta}((\alpha^i)^{p^r} + \alpha^i) \\ &= \log_{(\alpha^{p^r+1})^k}((\alpha^i)^{p^r} + \alpha^i) \\ &= k^{-1} \log_{\alpha^{p^r+1}}((\alpha^i)^{p^r} + \alpha^i) \end{aligned} \quad (16)$$

위의 수식은  $GF(p^r)$ 의 다른 원시원소에 의해 얻어진 두 개의 소나배열은 서로 곱셈 변환의 관계에 있다는 것을 보여주고 있다. 그러므로  $GF(p^r)$ 의 하나의 원시원소만 고려해도 충분함을 알 수 있다. 여기서는  $\beta = (\alpha^{p^r+1})$  을 사용한다. 이제 임의의 양의 정수  $k$  에 대해  $\alpha$  와  $\alpha^{p^r}$  이 같은 소나배열을 생성한다는 것을 증명한다.

$$\begin{aligned} &\log_{\beta} [ ((\alpha^{p^r})^i)^{p^r} + (\alpha^{p^r})^i ] \\ &= \log_{(\alpha^{p^r+1})^{p^r+1}} \left[ \text{tr}_{GF(p^{2r})}^{GF(p^r)}((\alpha^{p^r})^i) \right] \\ &= \log_{(\alpha^{p^r+1})^{p^r+1}} \left[ \text{tr}_{GF(p^{2r})}^{GF(p^r)}((\alpha^i)^{p^r}) \right] \\ &= \log_{\alpha^{p^r+1}}((\alpha^i)^{p^r} + \alpha^i) \end{aligned} \quad (17)$$

이와 같이 만약  $i, j$  가 같은 cyclotomic coset  $(\text{mod } p^{2r}-1)$  에 속한다면,  $\alpha^i$  와  $\alpha^j$ 로 생성된 소나배열은 동일하다. 그러므로 단지 coset leader만 고려해도 충분하다.

IV. Example

$GF(13)$ 의 원시원소  $\alpha=6$  을 생각해보자. Welch method에 의한 모듈라 소나배열  $f(i) = \alpha^i \pmod{13}, i=1, 2, \dots, 12$  는 다음과 같다.

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f(i)$	6	10	8	9	2	12	7	3	5	4	11	1

shuffling에 의해 그림 3과 같이 짝수 열과 홀수 열로 각각 나누면,

$i$	1	2	3	4	5	6
$f(2i)$	10	9	12	3	4	1
$f(2i-1)$	6	8	2	7	5	11

더 나은 소나배열 쌍을 얻기 위해서는  $u, s, a_A, a_B$  의 모든 가능한 조합에 대해 소나배열을 유지하는 변환을 취해보면 된다. 실제로 모든 가능한 조합에 대해 계산을 해보면,  $u=2, s=8, a_A=9, a_B=0$  이 최상의 소나배열 쌍을 만드는 것을 알 수 있다.

$$\begin{cases} g_A(i) = 2f(2i) + 8(2i) + 9 \\ g_B(i) = 2f(2i-1) + 8(2i-1) \end{cases} \pmod{13}$$

$i$	1	2	3	4	5	6
$g_A(i)$	6	7	3	1	6	3
$g_B(i)$	7	1	5	5	4	6

맨 위쪽 행부터 연속된 비어있는 행을 지우면, 그림 4와 같은 최상의 소나배열 쌍이 만들어진다.

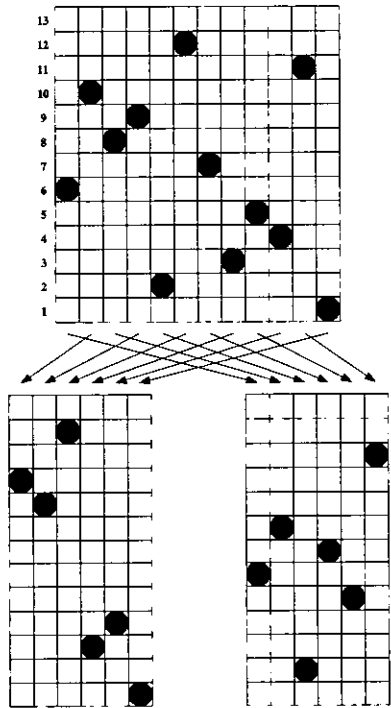


그림 3. 모듈라 소나배열의 Shuffling

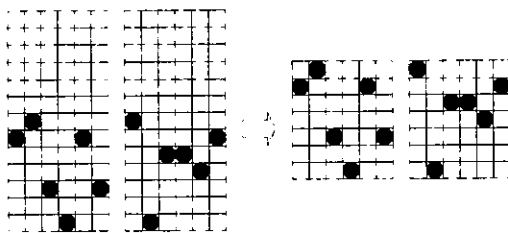


그림 4. 맨 위쪽 행부터 비어있는 연속된 행의 제거

### V. 결론

표 1은 대수학적으로 생성된 알려진 모든 소나배열 열로부터  $u, s, a_A, a_B$ 의 조합으로 얻어지는 모든 소나배열 쌍 중에서 최상의 소나배열 쌍의 열의 크기를 보여주고 있다. 괄호 안의 값은 middle-cutting

으로 얻어진 잘 알려진 소나배열 쌍의 크기이다<sup>[7]</sup>. 빈칸은 소나배열 쌍이 존재하지 않거나 그보다 작은 행에서 얻어진 열의 크기보다 빈칸에서 구한 열의 크기가 크지 않다는 것을 의미한다.

마지막으로 표 2에는 현재까지 전 영역 탐색을 통해서 알려진 주어진 행에 대해 가장 큰 열을 갖는 소나배열 쌍을 나열한 것이다. 여기서  $m \le 11$ 인 소나배열 쌍들은 주어진 각각의  $m$ 에 대해서 최상, 즉 가장 큰  $n$ 을 갖는 배열 쌍임이 확인되었다.

표 1. 가장 잘 알려진 소나배열 쌍

W:welch L:logarithmic E:extended exponential welch  
 G:golomb Q:quadratic S:shift sequence  
 s:shuffle m:middle-cut b:both shuffle and middle-cut

m	n	method	m	n	method
2	2(2)	all	15	12(10)	Qb,Sm
3	3(3)	all	16	12(12)	Em,Gm
4	4(4)	Em,Qb,Sb	17	12(12)	Gm,Sb
5	5(4)	Sm	18	13(12)	Sm
6	6(6)	Em,Qb,Sm	19	14(13)	Gm
7	6(6)	Ws,Es,Sb	20	15(13)	Qb,Gm,Sm
8	7(7)	Em,Qb,Sm	21	15(14)	Em
9	8(7)	Sb	22	16(15)	Qb,Sm
10	9(8)	Sm	23	16(16)	Em,Sb
11	10(9)	Qb	24	16(16)	
12	10(9)	Em,Sm	25	16(16)	
13	10(10)		26	18(16)	Sm
14	11(10)	Ws,Es	27	19(16)	Qb,Sm
28	19(19)	Em	65	40(37)	Sm
29	20(19)	Ss	66	40(37)	Em,Qb,Ss
30	22(19)	Em	67	42(40)	Qb
31	22(19)	Em	68	42(40)	
32	22(21)		69	42(40)	Sm
33	22(21)	Sm	70	42(40)	Em
34	23(22)	Gm	71	42(42)	
35	24(22)	Sm	72	42(42)	
36	24(22)		73	44(42)	Gm,Sb
37	24(23)	Em,Qb	74	45(42)	Qb,Sm
38	25(24)	Sm	75	45(42)	Em
39	25(24)		76	45(44)	
40	26(25)	Ws,Es	77	45(45)	
41	27(25)	Qb,Sm	78	45(45)	
42	27(25)	Em	79	45(45)	
43	27(27)		80	45(45)	

m	n	method	m	n	method
44	27(27)		81	49(45)	Qb
45	27(27)		82	49(45)	Sm
46	30(27)	Em	83	51(48)	Qb
47	30(27)	Em	84	51(48)	
48	31(29)	Qb	85	51(49)	Sm
49	31(30)	Sm	86	51(49)	Em
50	31(30)	Em	87	52(49)	Qb
51	32(31)	Sb	88	52(51)	Sm
52	32(31)		89	52(51)	Em
53	33(31)	Gm	90	54(52)	Sm
54	34(32)	Qb	91	54(52)	Qb,Sm
55	34(32)	Em,Sm	92	54(52)	Em,Gm
56	34(33)		93	55(54)	Qb
57	35(34)	Ss	94	55(54)	Sm
58	37(34)	Sm	95	57(55)	Qb
59	37(34)	Qb	96	57(55)	
60	37(36)		97	57(55)	Sm
61	37(36)	Em	98	57(55)	Em
62	37(37)		99	57(55)	
63	39(37)	Ss	100	57(57)	
64	39(37)				

표 2. 최상의 소나배열 쌍

m	n	best pairs of sonar arrays
7	7	0 0 5 2 6 5 1 3 6 0 6 4 5 0
8	8	0 2 3 7 1 6 1 7 5 3 0 7 7 0 3 2
9	8	0 0 1 0 6 8 5 0 5 8 1 6 4 0 8 2
10	9	0 0 1 3 9 3 8 5 0 8 4 2 9 8 0 3 7 0
11	10	0 0 6 9 5 10 8 0 2 10 7 2 9 10 0 10 4 8 1 0
12	11	0 8 5 11 11 4 0 5 0 7 9 3 6 10 0 1 10 9 7 1 11 0

참 고 문 헌

[1] Merrill I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1980.  
 [2] S. W. Golomb, "Algebraic constructions for Costas arrays," *Journal of Combinatorial*

*Theory*, series A., vol. 37, pp. 13-21, 1984.  
 [3] S. W. Golomb and H. Taylor, "Two-dimensional synchronization patterns for minimum ambiguity," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. IT-28, pp. 600- 604, 1982.  
 [4] S. W. Golomb and H. Taylor, "Constructions and properties of Costas arrays," *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, pp. 1143-1163, 1984.  
 [5] H. Y. Song and S. W. Golomb, "Two dimensional patterns with optimal auto- and crosscorrelation functions," *Proceedings of 1994 International Symposium on Information Theory*, pp. 362, 1994.  
 [6] S. V. Maric, E. L. Titlebaum, "A class of frequency hop codes with nearly ideal characteristics for use in multiple-access spread-spectrum communication and radar and sonar system," *IEEE Trans. on Communication*, vol. 40, no. 9, pp. 1442-1447, 1992.  
 [7] O. Moreno, R. Games, and H. Taylor, "Sonar sequences from Costas arrays and the best known sonar sequences with up to 100 symbols," *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 39, no. 6, pp. 1985-1987, 1993.  
 [8] R. Gagliardi, J. Robbins and H. Taylor, "Acquisition sequences in PPM communications," *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. IT-33, pp. 738-744, 1987.  
 [9] R. A. Games, "An algebraic construction of sonar sequences using M-sequences," *SIAM J. Algebraic Discrete Methods*, vol. 8, pp. 753-761, Oct. 1987.

김 정 현(Hong-Yeop Kim)

학생회원



1996년 2월 : 연세대학교  
 전자공학과 졸업(학사)  
 1998년 2월 : 연세대학교  
 전자공학과 졸업(석사)  
 1998년 3월~현재 : 연세대학교  
 전기전자공학과  
 박사과정

<주관심 분야> Error Correcting Codes, PN Sequences, CDMA, Spread Spectrum Communication

어 창 현(Chang-Hyun Eo)



1997년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 졸업(학사)  
1999년 2월 : 연세대학교  
전기컴퓨터공학과  
졸업(석사)  
1999년 3월~현재 : LG전자  
디지털 미디어 연구소  
NSIS Team

<주관심 분야> Error Correcting Codes, PN Sequences, Spread Spectrum Communication

홍 윤 표(Yun-Pyo Hong)

학생 회원



2000년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 졸업(학사)  
2000년 3월~현재 : 연세대학교  
전기전자공학과  
석사과정

<주관심 분야> Error Correcting Codes, PN Sequences, Spread Spectrum Communication

송 홍 엽(Hong-Yeop Song)

정회원



1984년 2월 : 연세대학교  
전자공학과 졸업(학사)  
1986년 5월 : USC 전자공학과  
졸업(석사)  
1991년 12월 : USC 전자공학과  
졸업(박사)

1992년~1993년 : Post Doc, USC 전자공학과  
1994년~1995년 : Qualcomm Inc., 선임연구원  
1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과  
부교수

<주관심 분야> Error Correcting Codes, CDMA, PN Sequences, Spread Spectrum Communication