

논문 2016-11-05

ZCZ 부호를 이용한 상호간섭에 강인한 차량용 확산대역 레이더 방식

(Mutual Interference-resilient Vehicular Spread Spectrum Radar
Using ZCZ Code)

김 봉 석, 이 종 훈*

(Bong-seok Kim, Jonghun Lee)

Abstract: We propose vehicular spread spectrum (SS) radar robust to mutual interference using zero correlation zone (ZCZ) code. SS radar schemes have been employed for vehicular radar systems due to their outstanding correlation property. However, this superiority is based on a premise that timing among codes is completely synchronized. In the practical driving environment, timing mismatch among radar signals is inevitable because the radar signals of several vehicles are independently transmitted at each different location and each timing and thus each radar signal is received at different timing. This timing offset is the main cause of orthogonality destruction among codes and thus radar signals from other vehicles become mutual interference. In order to solve this problem, we find out the new property of ZCZ code which maintains the complete orthogonality except to timing offset corresponding to chips (pulses) of multiple of 4 and employ ZCZ code to SS radar systems. Simulation results show the proposed scheme achieve better performance compared with the conventional SS radar scheme using pseudo code or gold code.

Keywords : Mutual interference, SS, Code, ZCZ

1. 서 론

차량용 레이더는 지능형 교통정보시스템 (ITS: intelligent transport systems) 및 차세대 지능형 자동차 기술에 있어 능동안전센서의 핵심 기술 중 하나로 대두 되었다. 특히, 레이더센서는 탐지거리가 짧은 초음파 센서에 비해 먼 곳 까지 탐지가 가능할 뿐 아니라, 카메라 센서가 동작하기 어려운 환경, 즉, 야간이나 안개 등과 같은 시계가 확보되지 않는 환경에서도 탐지가 가능한 장점을 갖는다 [1-3].

한편, 차량의 고급화로 인해 레이더가 장착된 차량이 증가하고, 또한 다수의 차량에서 방사된 레이

더 신호는 주행 차량의 레이더에 상호간섭원으로 동작하게 된다. 이러한 레이더 간의 상호간섭 문제를 해결하기 위해서 유럽연합에서는 MOSARIM (more safety for all by radar interference mitigation) 프로젝트 등의 다양한 연구들이 진행되고 있다 [4-9]. ITU-R 권고 M. 1452의 차량용 레이더시스템 요구사항에 의하면, 레이더 변조방식은 FMCW (frequency modulated continuous wave) 방식, 펄스 방식, 이중 주파수 CW 방식, 확산대역 (spread spectrum) 방식을 권장하고 있다 [10]. 그 가운데, 확산대역 [11-14] 방식의 부호 간의 직교성을 이용하여 상호간섭 문제 해결의 방법 가운데 하나로 제시한 바 있는데, 확산대역 레이더 방식은 직교성을 갖는 부호간의 우수한 상관특성 및 잡음에 강인하며 인터셉트 확률 또한 낮은 장점을 갖는다. 더욱이, 시간영역에서 펄스폭이 매우 좁아서, 협대역의 FMCW방식보다 다중 경로에 대한 페이딩에 강인하고, 송수신간의 격리 특성이 우수하며, 고해

*Corresponding Author (jhlee@dgist.ac.kr)

Received: 14. Oct. 2015, Accepted 20. Nov. 2015.

B. Kim, J. Lee: DGIST

※ 본 논문은 미래창조과학부에서 지원하는 대구 경북과학기술원의 기관고유사업(15-RS-01)에 의해 수행되었습니다.

상도를 갖는 장점을 갖는다 [15].

하지만, 확산대역 방식의 직교성 및 장점들이 유지되기 위해서는 사용되는 부호들 간의 완벽한 시간동기화가 가능하다는 전제가 필요하다. 실제 도로 환경을 고려해볼 때, 각 차량들은 각각 다른 위치에 존재할 뿐 아니라, 레이더 신호의 송신 타이밍도 일정하지 않으므로, 각 차량에서 전송된 신호들은 각각 다른 타이밍에 수신되므로, 신호들 간의 완벽한 동기화는 현실적으로 불가능하다. 이러한 신호 간의 시간동기오차는 부호 간의 직교성을 파괴하고 이로 인해 다른 차량으로부터 전송된 레이더 신호들은 간섭신호로 작용하게 된다.

확산대역방식의 차량용 레이더에 가장 널리 쓰이는 부호 중 하나인 PN (pseudo noise)부호는 생성과정이 쉽고, 초기 동기화가 용이하다는 특징을 갖는다 [12]. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이, PN 부호가 제대로 동작하기 위해서는, 부호 간의 완벽한 동기화를 전제로 한다. 만일 부호간의 시간 동기 오차가 존재하면, 부호간의 직교성이 파괴되어, 심각한 상관특성의 저하가 발생한다. 즉, 차량주변에 간섭신호원이 존재하지 않는 경우에는, PN 부호의 우수한 특성이 유지될 수 있다. 하지만, 주변에 다른 차량에 의한 레이더 간섭 신호원이 존재할 경우, 모든 레이더 신호가 일괄된 타이밍에 맞추어 수신되는 경우 현실적으로 불가능하므로, PN 부호의 상관특성이 열화되고, 이는 차량용 레이더의 탐지성능을 열화시키는 원인이 된다.

이러한 PN부호의 단점을 보완하기 위해서 골드부호 (PPGC: preferentially phased gold code) 방식이 제안되었다 [16]. 골드부호 방식은 다수의 PN부호 생성기를 조합하여 새로운 부호를 생성함으로써 PN부호의 장점을 유지하면서도, 부호들 간의 수 펄스 (칩)이내의 시간동기오차가 존재하더라도, 낮은 상호상관특성을 유지한다. 실제로, [17]에서는 골드부호를 이용함으로써, 시간 동기 오차가 존재하는 환경에서도 부호 간 시간지연을 수 펄스 (칩)이내로 유지할 수 있는 특성을 착안하여 준동기 CDMA (QS-CDMA: Quasi-Synchronous Code Division Multiple Access) 시스템을 제안하였다. 또한, [18]에서는, 골드부호를 확산대역 방식의 차량용 레이더 방식에 이용한 바 있다. 하지만, 상호간섭 성분들이 낮다 하더라도, 주변 차량의 수가 많은 경우에는 그 값들이 누적됨으로써, 성능 저하의 원인이 될 수 있다.

참고문헌 [19]에서는 수칩 이내의 시간동기오차가 존재하더라도 부호 간의 직교성을 유지하는

ZCZ(zero correlation zone)부호 [20, 21]를 확산대역 레이더 방식에 적용하고 상호간섭의 정도를 분석하였다. 하지만, 고려한 오차 범위의 구간이 ZCZ 부호가 직교성을 유지하는 범위인 ± 3 칩 이내로 한정된 문제점이 있다. 실제 도로 환경에서는 ± 3 칩에 해당하는 시간보다 확연히 큰 시간 오차가 빈번히 발생한다. 따라서, 보다 넓은 시간 오차 범위에 대해 고려할 필요가 있다. 또한, [19]에서는 각 부호들에 대한 상호간섭 성분의 크기를 고려하였을 뿐, 탐지 성능에 대한 분석을 포함하지 않았다.

본 논문에서는 ZCZ 부호의 새로운 특성을 발견하고, 레이더 신호 간 시간 오차의 범위를 ZCZ 부호가 직교성을 유지하는 범위를 확연히 넘어선 영역까지 확대하여 확산대역 방식에서의 ZCZ 부호 성능을 분석한다. 더욱이, 상호간섭 성분의 크기가 아닌 각 부호 방식을 이용하여 거리를 탐지하고 다양한 조건들에 대해 성능들을 비교한다. 모의전산실험결과를 통해, ZCZ 부호를 이용한 레이더 방식이 기존의 골드부호 기반의 차량용 레이더방식에 비해서 우수한 상호간섭특성을 가짐을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 확산대역방식에 사용되는 PN 부호, 골드 부호, ZCZ 부호의 생성과정 및 상관특성을 살펴본다. III절에서는 확산대역변조를 이용한 차량용 레이더 방식의 시스템 모델 및 다수의 차량이 존재하는 환경에서 고려하는 성분과 시간오차로 인해 발생한 간섭성분의 구조를 수식으로 분석한다. IV절에서는 모의전산실험을 통해서 다수의 차량이 존재하는 환경에서 PN 부호와 골드부호와 ZCZ 부호를 이용한 차량용 레이더의 상호간섭 성능을 비교분석하고 V절에서 결론을 맺는다.

II. 확산대역 부호 및 상관특성

본 절에서는 확산대역방식의 차량용 레이더에서 대표적으로 사용되는 부호들과 ZCZ 부호들의 생성과정 및 상관특성을 기술한다.

1. 의사잡음(PN: pseudo noise) 부호

의사잡음 (이하: PN) 부호는 확산대역 방식에서 대표적으로 사용되는 부호로서, m-sequence (또는 maximum length code sequence)라고도 불린다. 이 부호는 칩의 배열을 무작위로 결정하여 주기적으로 반복하여 생성하며, 표본화된 백색잡음의 통계적 특성을 지닌다. 그림 1에서와 같이, 이진 칩이

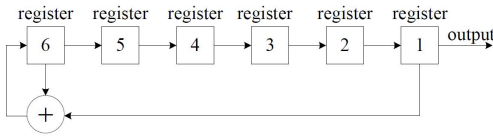


그림 1. PN 부호 생성기의 예 (부호길이=63)
 Fig. 1 Example of PN code generator with length of code = 63

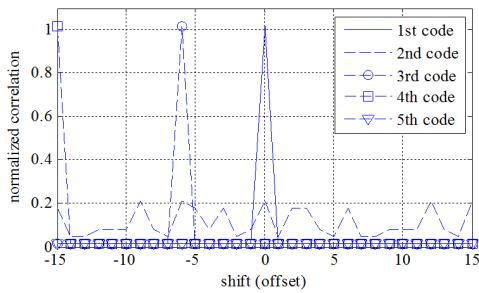


그림 2. PN부호의 상호상관특성 (부호길이=63)
 Fig. 2 Correlation property of PN code with length of code = 63

레지스터 시퀀스 생성기 (binary shift register sequence generator)를 통해서 생성되며, 레지스터 길이가 N 일 때, 최대 $2^N - 1$ 의 길이를 갖는다.

그림 2는 그림 1의 생성기에 의해서 생성된 다수의 PN부호들의 상호상관 값을 보인 결과이다. 각 부호들은 레지스터들의 초기 값을 변경하며 생성하였다. 시간동기가 완벽한 경우 즉, shift=0인 경우, 같은 부호와의 상관 값은 자기상관 값이므로 아주 점예한 값을 가지고 다른 부호들 간의 상관 값 즉 상호상관 값은 매우 작음을 알 수 있다. 하지만, 동기오차가 발생함에 따라, 세 번째 그리고 네 번째 부호와의 상호 상관 값이 매우 큰 특성을 가진다. 이는 부호 간의 동기 오차가 존재할 경우, 일시적으로 상호상관 값이 커지는 현상이 발생함을 보여준다.

즉, 부호 간의 시간동기오차로 인해서 큰 상호간섭이 존재한다. 만일, 레이더가 장착된 차량이 단정한 대이거나 각 차량에서 송신된 레이더 신호들이 정해진 타이밍에 수신된다면 확산대역 방식의 장점을 유지할 수 있다. 하지만, 실제 도로환경을 고려할 경우 각 차량들은 각각 다른 위치에 존재할 뿐 아니라, 송신 타이밍 또한 독립적이므로 각 신호의 완벽한 동기화는 현실적으로 불가능하다. 따라서,

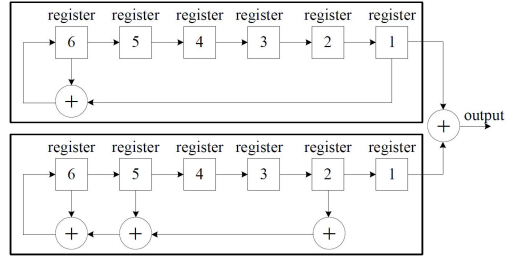


그림 3. 골드 부호 생성기의 예 (부호길이=63)
 Fig. 3 Example of gold code generator with length of code = 63

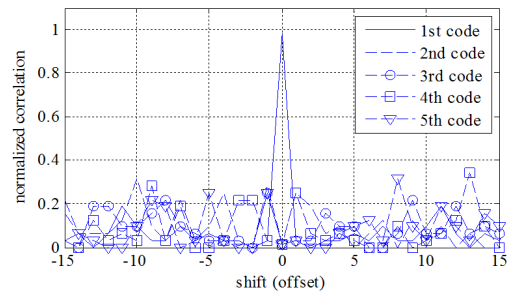


그림 4. 골드부호의 상호상관특성 (부호길이=63)
 Fig. 4 Correlation property of gold code with length of code = 63

시간오차에 의한 부호 간의 직교성 파괴는 불가피하여, 다른 차량에서 전송된 레이더 신호들이 상호 간섭으로 작용하게 된다. 특히, 차량의 수가 증가할수록 그 간섭의 정도는 더욱 커질 수 있어, PN 부호는 차량용 확산대역 레이더 방식에 적합하지 않을 수 있다.

2. 골드부호

이전 절에서 언급한 대로, 시간동기오차가 존재하는 경우 PN부호의 상호상관 값이 높아지는 문제점을 해결하기 위해, 골드부호 방식이 제안되었다. 골드부호는 그림 3에서와 같이 다수의 PN부호를 조합하여 생성한다. 참고문헌 [14]에서는 골드부호가 시간 동기 오차가 존재하는 환경에서 부호 간 시간지연을 수 펄스(칩)이내로 유지할 수 있는 특성을 이용하여 준동기 CDMA 시스템을 제안한 바 있다. 골드부호는 $\{-1, -c(m), c(m)-2\}$ 세 가지 종류의 상호상관 값을 가진다. 여기서, m 은 레지스터의 개수이며, $c(m)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$c(m) = \begin{cases} 2^{(m+1)/2} + 1, & \text{if } m = \text{odd} \\ 2^{(m+2)/2} + 1, & \text{if } m = \text{even} \end{cases} \quad (1)$$

그림 4는, 그림 3의 골드부호 생성기에 의해 생성된 다수의 골드부호들 간의 상호상관 값을 보인 결과이다. 시간 동기오차가 없는 경우에는, 동일한 부호 간에는 큰 상호상관 값을 갖는 반면, 다른 부호들 간에는 낮은 상호상관 값을 가짐을 알 수 있다. 부호간의 시간동기오차가 있는 경우에도 0.4미만의 상호상관 값을 가진다. 즉, 시간 동기오차 환경에서 1에 가까운 상호상관 값을 가졌던 PN 부호에 비해 개선된 상관특성을 가짐을 알 수 있다. 하지만, 각각의 상호간섭 성분들이 낮다 하더라도, 주변 차량의 수가 많은 경우에는 그 값들이 누적됨으로써, 성능이 저하되는 단점이 존재할 수 있다. 또한, 골드부호는 부호간 동기화가 일치하더라도 0의 상관 값이 아닌 낮은 상관 값을 가지므로, 사용자의 수가 적거나 동기화가 용이한 경우 PN 부호에 비해 성능이 저하될 수 있는 단점이 존재한다.

3. ZCZ부호

ZCZ부호는 동기오차의 허용범위내에서 부호간의 동기 오차가 존재하더라도 상호상관 값이 0인 특성으로 인해 골드부호에 비해서 우수한 상호상관 특성을 갖는다 [20, 21]. ZCZ 부호의 생성과정은 그림 5와 같으며, 자세한 과정은 다음과 같다 [21].

· step 1: 부호의 길이를 L 이라 할 때, $L/4$ 에 해당하는 스크램블 부호를 만든다. 만일, l 번째 스크램블 부호를 S_l 이라 할 때, $1 \leq l \leq L/4$ 에 대해서 S_l 을 생성한다. 이때, 다음 4개의 복소수 값 중 랜덤하게 선택된다.

즉, $S_l \in \{1+i, 1-i, -1+i, -1-i\}$ 이다.

· step 2: step 1에서 $1 \leq l \leq L/4$ 에 대해서 생성한 스크램블 부호열 S_l 을 $L/4+1 \leq l \leq L/2$ 에 대해서도, 복사하여 연결함으로써, 길이 $L/2$ 의 부호열을 만든다. 다음으로 $L/4+1 \leq l \leq L/2$ 에 대한 S_l 에 복소평면에서 90° 회전을 시킨다. 즉, S_l 에 l 이 증가할 때 마다 $1, i, -1, -i, 1, i, \dots$ 를 순차적으로 곱한다. 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$S_{L/4+l} = (j^{l-1})S_l \quad \text{for } 1 \leq l \leq L/4 \quad (2)$$

· step 3: step 2에 의해서 새롭게 생성한 길이 $L/2$ 의 스크램블 부호 즉, $1 \leq l \leq L/2$ 에 대한 S_l

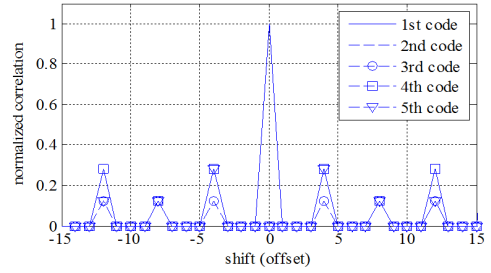


그림 5. ZCZ부호의 상호상관특성 (부호길이=64)

Fig. 5 Correlation property of ZCZ code with length of code = 64

을 복사하여 $L/2+1 \leq l \leq L$ 에 대해서도 복사하여 연결하여 길이 L 의 부호열을 만든다. 다음으로 $L/2+1 \leq l \leq L$ 에 대한 $S(l)$ 에 복소평면에서 180° 회전 즉, 1과 -1 을 반복하여 순차적으로 곱하여 길이 L 즉, $1 \leq l \leq L$ 의 $S(l)$ 을 만든다.

$$S_{L/2+l} = (-1)^l S_l \quad \text{for } 1 \leq l \leq L/2 \quad (3)$$

· step 4: step 3을 통해서 만들어진 길이 L 의 스크램블 부호에 p 번째 WH(Walsh Hadamard) 부호의 l 번째 성분을 $W_l^{(p)}$ 라 할 때 $W_l^{(p)}$ 와 S_l 을 곱함으로써 최종적으로 ZCZ 부호 $c_{l,ZCZ}^{(p)}$ 를 생성한다. 식(4)와 같이 표현된다.

$$c_{l,ZCZ}^{(p)} = W_l^{(p)} S_l \quad \text{for } 1 \leq l \leq L \quad (4)$$

그림 6은 ZCZ 부호의 상관특성을 보인다. ± 3 칩 이내에 오차가 존재하는 경우 시간동기오차가 존재하더라도 직교성이 유지되어 모든 부호 간의 상관도가 0임을 알 수 있다. 하지만, ± 3 칩 이상의 시간 동기오차가 존재하는 경우 직교성이 파괴되어 상호상관 값이 발생한다. 특히, ± 4 칩, ± 8 칩, ± 12 칩의 배수에 해당하는 칩오차가 발생하는 경우 0.3이하의 상호상관 값이 존재한다. 하지만, ± 4 칩의 배수 외의 칩오차가 존재하는 경우 완벽한 직교성이 유지되고, 직교성이 파괴된 경우에도 그 상관 값이 PN 부호나 골드부호에 비해 작음을 알 수 있다. 따라서, 시간동기오차가 존재하는 환경에서는 PN 부호나 골드부호에 비해 ZCZ 부호가 차량용 확산대역레이더 방식에 더욱 적합함을 기대할 수 있다.

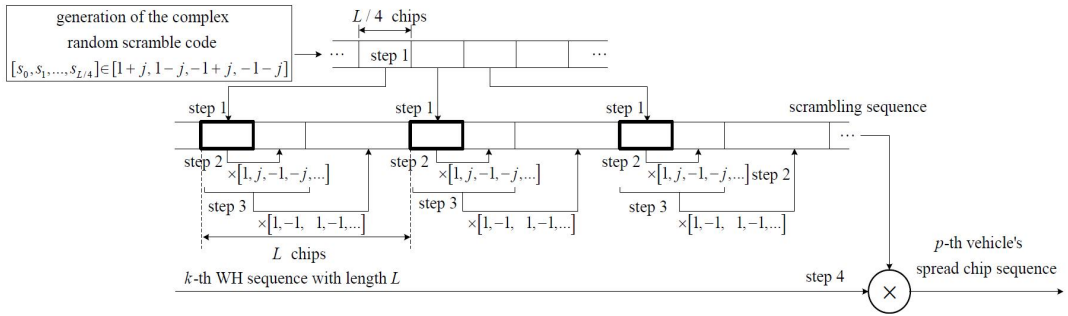


그림 6. ZCZ 부호 생성기 과정
Fig. 6 Structure of ZCZ code generator

III. 시스템 모델 및 상호간섭 분석

1. 시스템 모델

본 논문에서는 확산대역방식 가운데 직접확산(DSSS: direct sequence spread spectrum)방식을 고려하며, 그림 7에서와 같이 주행차량과 대상차량과 주변의 간섭차량으로 구성하였다. 총 P 개의 차량이 존재한다고 가정하며, 주행차량 (subject vehicle)과 목표차량 (object vehicle)과의 거리는 R 이다. 주행차량의 레이더 수신신호를 $y(t)$ 로 표기하고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) = Ax(t - \tau_d) + I(t) + z(t) \quad (5)$$

여기서, $x(t)$ 는 송신신호이고, τ_d 는 송신신호 $x(t)$ 가 대상차량에 반사되어 수신되는 과정에서 발생한 지연시간으로, v_c 가 광속일 때 $\tau_d = 2R/v_c$ 로 정의된다. 여기서, A 는 $x(t)$ 가 송수신 과정에서 겪은 복소감쇄성분이고 $z(t)$ 는 복소가산백색잡음(AWGN)성분을 의미한다. 길이 L 인 부호를 이용하여 신호를 전송하므로, $x(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$x(t) = \sum_{m=0}^{N_s} \sum_{l=0}^{L-1} c_l g(t - (Lm+l)T_c) \quad (6)$$

여기서, c_l 은 골드부호, PN부호, ZCZ부호와 같은 시퀀스 부호의 l 번째 칩이고, $g(t)$ 는 구형파이며, T_c 는 부호의 한 칩의 구간을 나타내고, N_s 는 연속해서 전송한 부호의 개수를 의미한다. 식 (5)에서 $I(t)$ 는 간섭신호로서, 다음과 같이 표현된다.

$$I(t) = \sum_{p=1}^{P-1} A^{(p)} x^{(p)}(t - \tau_d^{(p)}) \quad (7)$$

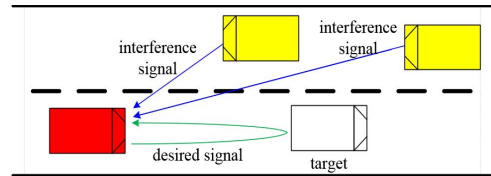


그림 7. 차량용 레이더의 상호간섭 시스템 모델
Fig. 7 System model of mutual interference among vehicular radar signals

여기서, $p=0$ 이 아닌 $p=1$ 부터 시작되는 것은 0번째 인덱스는 자신의 차량임을 의미하기 때문이다. 또한, $(\cdot)^{(p)}$ 는 간섭을 일으키는 p 번째 차량임을 나타낸다. 예를 들어, $x^{(p)}(t)$, $A^{(p)}$ 는 각각 p 번째 차량으로부터 수신된 레이더 송신신호와 감쇄성분을 나타낸다. 예외적으로, $\tau_d^{(p)}$ 는 앞서 언급한 τ_d 와는 다른 의미이다. 즉, 왕복시간인 τ_d 와 달리, P 개의 간섭차량에서는 각각 독립적이면서 무작위한 타이밍으로 레이더 신호를 송신하는데, p 번째 차량으로부터 전송된 신호가 도달한 지연시간 성분이다. 즉, $R^{(p)}$ 는 주행차량과 주변의 p 번째 차량과의 거리라고 할 때, $\tau_d^{(p)} = R^{(p)}/v_c$ 이다.

2. 상관함수 분석

대역확산방식기반의 차량용 레이더는 수신신호 $y(t)$ 와 송신신호 $x(t)$ 의 상호상관함수(cross correlation function) $r_{xy}(t, \tau)$ 를 통해서 최대 (peak)값을 갖도록 하는 τ 로부터 거리 R 을 추정할 수 있다 [22]. 이때, AWGN 성분 $z(t)$ 와 $x(t)$ 는 상관성을 무시한다고 가정한다면, $r_{xy}(t, \tau)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
r_{xy}(t, \tau) &= \int_{t=0}^{LN_s T_c} y(t) x^*(t) dt \\
&= \int_{t=0}^{LN_s T_c} (Ax(t - \tau_d) + I(t)) x^*(t - \tau) dt \\
&= \int_{t=0}^{LN_s T_c} \left(A \sum_{i=0}^{LN_s - 1} c_i g(t - \tau_d - iT_c) \right) \\
&\quad \times \left(\sum_{k=0}^{LN_s - 1} c_k g(t - \tau - kT_c) \right)^* dt \\
&\quad + \int_{t=0}^{LN_s T_c} I(t) x^*(t - \tau) dt
\end{aligned} \quad (8)$$

자기신호에 대한 성분 즉 식 (8)의 첫 번째 적분식을 $r_{xy}^{(d)}$ 와 간섭성분 즉 식 (8)의 두 번째 적분식을 $r_{xy}^{(I)}$ 로 표기한다. 자기신호에 대한 성분 $r_{xy}^{(d)}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
r_{xy}^{(d)}(t, \tau) &= A \sum_{i=0}^{LN_s - 1} \sum_{k=0}^{LN_s - 1} c_i c_k^* \\
&\quad \times \int_{t=0}^{LN_s T_c} g(t - \tau_d - iT_c) g^*(t - \tau - kT_c) dt
\end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 적분식 내의 $g(t)$ 는 자기상관함수이므로 이를 $r_{gg}(\tau)$ 로 표기하면 식 (9)는 다음과 같이 표현된다.

$$r_{xy}^{(d)}(\tau) = A \sum_{i=0}^{LN_s - 1} \sum_{k=0}^{LN_s - 1} c_i c_k^* r_{gg}(\tau - \tau_d + (k - i)T_c) \quad (10)$$

자기상관함수 $r_{gg}(\tau)$ 는 $\tau=0$ 일 때 최대값을 가진다. 즉 식(10)에서 $\tau_d - (k - i)T_c = 0$ 일 때, 최대값을 가진다. 최종적으로 $\tau_d = 2R/v_c$ 이므로 추정거리 \hat{R} 을 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{R} = v_c T_c (k - i) / 2 \quad (11)$$

간섭성분의 상관 값 $r_{xy}^{(I)}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
r_{xy}^{(I)}(t, \tau) &= \int_{t=0}^{LN_s T_c} \left(\sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=0}^{LN_s - 1} c_i^{(p)} g(t - \tau_d^{(p)} - iT_c) \right) \\
&\quad \times \left(\sum_{k=0}^{LN_s - 1} c_k g(t - \tau - kT_c) \right)^* dt \\
&= \int_{t=0}^{LN_s T_c} \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=0}^{LN_s - 1} \sum_{k=0}^{LN_s - 1} \\
&\quad c_i^{(p)} g(t - \tau_d^{(p)} - iT_c) c_k^* g^*(t - \tau - kT_c) dt
\end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $\tau = \tau_d^{(p)} + (i - k)T_c$ 의 조건을 만족하면, 각

표 1. 전산실험에 사용한 파라미터 값

Table 1. Parameters for simulation	
parameter	value
modulation	DSSS
center frequency	24 GHz
chip duration, T_c	11 ns
bandwidth	91 MHz
number of vehicles, P	8
number of iterations, N_s	4
code length, L	63 (PN, Gold), 64 (ZCZ)

부호들 간의 동기화가 완벽하다면, 부호의 고유한 특성에 의해서 서로 다른 부호들은 직교성에 의해서 $r_{xy}^{(I)}$ 가 0 또는 $r_{xy}^{(d)}$ 에 비해 매우 작은 값이 된다. 즉, p 는 1에서부터 $P-1$ 까지 $\tau_d^{(p)} = \tau_d$ 인 경우 부호 간의 직교성이 유지되어, 주행 차량의 주변차량으로부터 전송된 신호들의 간섭을 받지 않는다.

하지만, 실제적인 도로환경을 고려할 때, 주변 차량들은 주행 차량으로부터 각기 다른 위치에 존재하며, 레이더 신호 또한 각각 독립적인 타이밍으로 송신되므로, 앞서 언급한 시간동기화 조건을 만족하는 것은 현실적으로 불가능하다. 시간동기오차가 존재할 경우 부호 간의 직교성이 파괴되므로, 간섭신호성분인 $r_{xy}^{(I)}$ 가 크게 발생할 수 있다. IV절에서는 시간동기오차 환경에서 각 부호의 방식들의 성능을 모의전산실험을 통해 비교 분석한다.

IV. 모의전산 실험 결과

본 절에서는 모의전산실험을 통해서 제안하는 방식의 성능을 살펴본다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 총 8대의 차량이 존재하고 ($P=8$), 거리를 탐지하고자 하는 목표차량의 대수는 1대로 가정한다. 부호의 길이 L 은 PN부호와 골드부호의 경우 63으로 ZCZ 부호의 경우 64로 설정하였고, AWGN 환경을 가정한다. 부호의 칩 구간 T_c 는 11ns이고, 반복횟수 N_s 는 4로 설정하였다. 차량용 레이더의 중심주파수 f_c 는 24GHz로 설정하였다.

그림 8은 최대지연시간오차의 이해를 위해 주행차량과 주변차량간의 레이더신호의 부호간의 시간동기오차가 존재하는 경우의 예를 보인다. 총 4대의 차량으로부터 레이더 신호가 송신되어 각기 다른 타이밍에 수신되었다. 이때, 가장 먼저 수신된 신호 (first arrival signal)는 주행차량에서 전송된

레이더 신호가 대상차량에 반사되어 수신한 신호

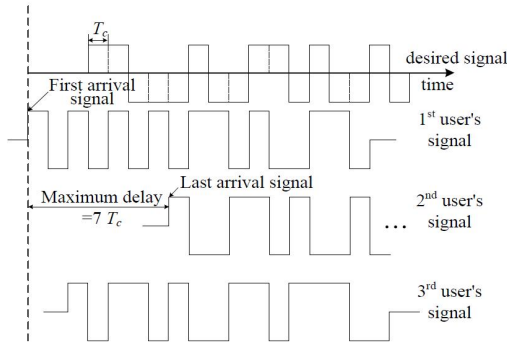


그림 8. 부호 간 최대시간 지연을 보인 예

Fig. 8 Example of maximum delay among codes

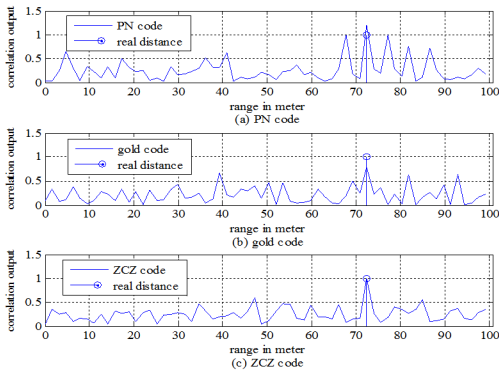


그림 9. 확산대역방식의 거리 추정을 위한 상관 결과 (SNR=10dB, 부호 간 최대오차수=±15칩, 차량수 P=8, 부호길이=63, 64)

Fig. 9 Correlation output of SS radar for range detection with max offset=±15 chips, P=8, L=63 and 64

(desired signal)에 비해 3칩 먼저 수신되었으며, 가장 늦게 수신된 신호 (last arrival signal)는 4칩 늦게 수신되었음을 보인다. 만일, 모든 레이더 신호가 동일한 시간에 전송되었다고 가정하면, 가장 먼저 도착한 신호와 늦게 도착한 신호의 차량은 각각 주변차량으로부터 3T_cv_c와 4T_cv_c 떨어진 위치에 존재함을 알 수 있다.

그림 9는 PN부호와 골드부호 ZCZ 부호를 이용한 경우 확산대역 레이더 방식으로 대상차량의 거리를 탐지하기 위한 상관 값을 보인다. 그림 9. (a)에서 보인대로, PN부호를 이용한 경우, 시간오차에 의한 간섭들로 인해 72m 지점 이외에도 큰 피크 값들이 다수 존재함을 알 수 있다. 반면에, 그림 9.

(b)에서는 골드부호를 이용할 경우, PN 부호에 비해

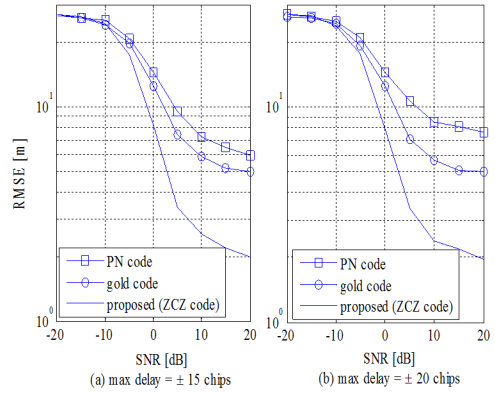


그림 10. SNR에 따른 거리 RMSE 특성 (부호 간 최대오차수=±15, 20칩, 차량수=8, 부호길이=64)

Fig. 10 RMSE according to SNR with max offset=±15, 20 chips, P=8, L=63 and 64

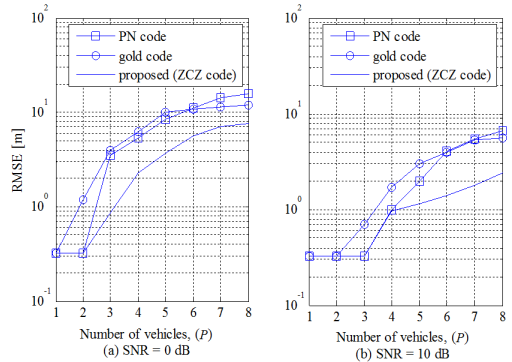


그림 11. 차량수에 따른 거리의 RMSE 특성 분석(부호 간 최대오차수=±15칩, 부호길이=63, 64)

Fig. 11 RMSE according to the number of vehicles with max offset=±15 chips, P=8, L=63 and 64

상관특성이 우수하여 72m 지점에 상대적으로 큰 피크 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 9. (c)는 제안하는 방식, ZCZ 부호를 이용한 경우, ZCZ방식의 우수한 상관특성으로 인해 72m 지점에서 확연히 구분되는 피크 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 10은 다양한 확산대역방식의 차량용 레이더의 SNR (signal to noise ratio)에 따른 추정 거리의 RMSE (root mean square error)를 나타낸다. 주변 차량에서의 신호는 목표차량의 레이더 신호의 도달 시간에 비해서 최대 ±15칩과 ±20칩의

최대오차가 존재하는 것으로 가정한다. 앞서 관찰한 대로, 시간 오차가 존재하는 경우에는 ZCZ 부호를 사용한 경우 골드부호나 PN 부호를 사용한 경우에 비해 낮은 RMSE를 가짐을 알 수 있다. 특히, 골드부호나 PN 부호들은 SNR을 증가시키더라도 RMSE가 낮아지지 않음을 알 수 있다.

그림 11은 차량 수에 따른 RMSE를 보인다. 차량 수가 증가할수록 시간동기오차에 의한 간섭신호량이 증가하므로, RMSE가 증가함을 알 수 있다. 특히, 차량의 수가 작은 경우, 골드부호가 PN부호에 비해 오히려 높은 RMSE를 가지며, 차량의 수가 많은 경우 골드부호의 RMSE가 낮음을 알 수 있다. 이는 차량의 수가 적은 경우 부호 간 동기오차가 발생할 확률이 상대적으로 낮고, 이때, PN 부호는 0의 상관 값을 가질 수 있지만, 골드부호의 경우 0이 아닌 상관 값을 갖기 때문이다. 제안하는 방식은 두 방식에 비해 확연히 낮은 RMSE를 달성함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 ZCZ부호를 이용함으로써 차량용 레이더에 적합한 확산대역방식을 제안하였다. 시간 동기오차 환경에서도 우수한 상관특성을 갖는 ZCZ 부호의 장점으로 주변 차량들의 간섭신호에 강한 특성을 갖게 하였다. 다양한 모의전산실험을 통해, 제안하는 방식이 골드부호나 PN 부호에 비해 확산대역레이더 방식에 적합함을 보였다.

References

- [1] B. Kang, N. Kim, S.J. Kim, "Ranging performance analysis of a vehicular radar chirp signals with various frequency bands," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 9, No. 12, pp. 57-63, 2011 (in Korean).
- [2] D. Choi, S. Lee, Y. Jung, J. Yoon, S. Lee, "A study on false detection elimination method for ground vehicle FMCW radar," *Proceedings of information and control symposium 2011*, pp. 400-401, 2011 (in Korean).
- [3] J. Bae, E. Hyun, J.H. Lee, "An automotive radar target tracking system design using filter and $\alpha\beta$ algorithm," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.* Vol. 6, no. 1, pp. 16-24, 2011 (in Korean).
- [4] M. Kunert, "The EU project MOSARIM: A general overview of project objectives and conducted work," *Proceedings of Radar Conference* pp. 1-5, 2012.
- [5] T. Schipper, M. Harter, L. Zwirello, T. Mahler, T. Zwick, "Systematic approach to investigate and counteract interference-effects in automotive radars," *Proceedings of IEEE 9th European Radar Conference*, 2012.
- [6] C. Fischer, M. Goppelt, H.L. Blöcher, J. Dickmann, "Minimizing interference in automotive radar using digital beamforming," *Advances in Radio Science*, Vol. 9, pp. 45-48, 2011.
- [7] D. Oprisan, H. Rohling, "Analysis of mutual interference between automotive radar systems," *Proceedings of International Radar Symposium*, pp. 84, 2005.
- [8] G.M. Brooker, "Mutual interference of millimeter-wave radar systems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 49, No. 1, pp. 170 - 181, 2007.
- [9] M. Goppelt, H.-L. Blocher, W. Menzel, "Automotive radar investigation of mutual interference mechanisms," *Advances in Radio Science*, vol. 8, pp. 55 - 60, 2010.
- [10] ITU-R Recommendation, "Transport information and control system-low power short-range vehicular radar equipment at 60 GHz and 76 GHz", M. 1452, 2000.
- [11] R. Zetik, J. Sachs, R.S. Thoma, "UWB short-range radar sensing: the architecture of a baseband, pseudo-noise UWB radar sensor," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 10, No. 2, pp. 39-45, 2007.
- [12] M.K.J. Sachs, R. Herrmann, K. Schilling, R. Zetik, P. Rauschenbach, "Ultra-wideband pseudo-noise radar: principle of function, state of the art, applications," *Proceedings of NATO Specialist Meeting*, Vol. 120, 2008.
- [13] X. Zhang, D. Wu, X. Xi, Z. Song "Suppression of direct wave and wall clutter for through-wall imaging by spread spectrum radar," *IEEE Sensors Applications*

- Symposium, 2015.
- [14] S. Shome, R.N. Bera, S.N. Sur, R. Adhikary "Moving target detection and Doppler extraction using digital spread spectrum radar," International Journal of Intelligent Systems and Applications, Vol. 10, No. 10, pp. 47-54, 2014.
- [15] S.K. Hong, B.H. Kim, R.G. Jeong, K.S. Kwak, "UWB RADAR based modified adaptive CFAR algorithm for improved safety of personal rapid transit," The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, vol. 12, no. 1, pp. 28~42, 2013 (in Korean).
- [16] D.V. Sarwate, M.B. Pursley, "Cross correlation properties of pseudo random and related sequences," Proceedings of the IEEE, Vol. 68, No. 5, pp. 593 - 619, 1980.
- [17] R.D. Gaudenzi, C. Elia, R. Viola "Band limited quasi-synchronous CDMA: a novel satellite access technique for mobile and personal communication systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 10, No. 2, pp. 328-343, 1992.
- [18] S. Susanna, G. Ennio, "Spread spectrum radar technology for automotive applications: state of the art and new proposals," Academy Publish, vehicle engineering, pp. 113-147, 2014.
- [19] B. Kim, J. Lee, "Mutual interference cancellation method using ZCZ code for automotive Radar systems," Proceedings of IEMEK 10th International Symposium on Embedded Technology, 2015.
- [20] G. Ye, J. Li, A. Huang, H. Chen, "A novel ZCZ code based on m-sequences and its application in CDMA systems," IEEE Communications Letters, Vol. 11, No. 6, pp. 465-467, 2007.
- [21] K. Choi, L. Liu "Quasi-synchronous CDMA using properly scrambled Walsh codes as user-spreading sequences," IEEE Transactions on vehicular Technology, Vol. 59, No. 7, 2011.
- [22] C. Sturm, W. Wiesbeck, "Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing," Proceedings of the IEEE, Vol. 99, No. 7, pp. 1236 - 1259, 2011.

Bong-seok Kim (김 봉 석)



He received his B.S. degree in department of electronics engineering in 2006 and the M.S. and Ph.D. degrees in department of information and communications Engineering of Yeungnam Univ., Korea, in 2009 and 2014, respectively. Since 2014, he is currently working in Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology (DGIST), Korea, as a post-doc. His current interests include multi-functional radar systems, radar signal processing and physical layer for 5G communication systems.

Email: remnant@dgist.ac.kr

Jong-Hun Lee (이 종 훈)



He received the B.S. degree in electronics engineering from SungKyunKwan Univ., Korea, in 1996 and obtained the M.S. and Ph.D. degrees in electrical and electronics and computerscience from SungKyunKwan Univ., Korea, in 1998 and 2002, respectively. From 2002 to 2005, he joined in Samsung Electronics Company as a Senior Research engineer. Since 2005, he has joined in Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology (DGIST), Korea, as a Principle research engineer. His primary research interests are the detection, tracking, recognition for radar (FMCW & UWB radar), vision-based vehicle sensor and radar signal processing.

Email: jhlee@dgist.ac.kr