2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

Digital Beam Forming 기술의 차량 충돌 방지용 레이더 응용

박영진, 김관호, 이원태, 오휘명
한국전기연구원

Automotive Cruise Control (ACC) Radar Application of Digital Beam Forming Technique

Young-Jin Park, Kwan-Ho Kim, Won-Tae Lee, Hui-Myoung Oh
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

Abstract - 본 논문에서는 수신 측에서 Digital Beam Forming 기술을 응용한 새로운 개념의 차량 충돌 방지용 레이더를 소개한다. 이는 기존의 기술보다 더 넓은 범위에서 차량 탐색이 가능하고, 고해상도를 가지면서, 한 측정 단위 셀 내에서 여러 개의 물체를 찾아낼 수 있다. 제안된 방법은 기존 차량충돌 방지용 레이더의 송수신 안테나에 있어서의 많은 제약을 극복할 수 있는 방법이다.

1. 서 론

현재 차량 충돌 방지용 레이더는 76-77GHz 밀리미터 대역을 사용하고 있으며, 전체 레이더 시스템을 소형화하여 차량의 전방에 설치한다. 레이더는 도로의 수평 방향으로 전방의 차량을 탐지하기 위해 수평방향으로 3° 이하의 3dB 대역폭을 요구한다 [1]-[3]. 이 조건은 하드웨어 측면에서 고이득의 안테나를 필요로 하게 되며, 또한 전체 시스템은 최소한 ±5°의 스캔 각도 (scan angle)를 가지도록 설계되어야 한다. 그러나 넓은 스캔 각도, 고해상도를 가지며 간단한 하드웨어적 구현은 기존의 기술로는 서로 상반된다. 더욱이 미래 차량용 레이더의 목표인 자동 운행 시스템 (automatic cruise)을 위해서는 차량용 레이더는 차량의 전 방향에 대한 감시가 요구된다. 따라서 기존의 기술로는 하드웨어적 구현이 어려워 미래 차량용 레이더에 대한 요구를 충족시키지 못한다.

본 논문에서는 기존의 차량용 레이더 기술을 대치할 수 있는 새로운 개념의 레이더를 소개한다. 이는 수신 측에서 Digital Beam Forming 기술을 사용하여, 가상 배열 구조를 만들어 고이득의 송수신 안테나를 사용하지 않더라도 고해상도의 특성을 가질 뿐만 아니라, 기존의 기술보다 더 넓은 영역에서 물체 탐색이 가능하다 [4].

전체 시스템은 수신과 송신이 구분되어 있어 송신 모드에서도 계속 신호를 수신할 수 있게 했다. 시스템 설계를 위해 본 논문에서는 평행평판 Luneburg 렌즈를 사용하였다. 이 렌즈는 다중 빔을 생성할 수 있고, 광대역 특성을 갖기 때문에 시스템 구현을 위해 선택하였다.

2. 본 론

2.1 평행평판 Luneburg 렌즈

그림 1에 평행평판 Luneburg 렌즈 안테나가 있다. 안테나는 회전축을 중심으로 대칭인 구조를 갖는 렌즈와 여기를 위한 혼안테나로 구성되었다. 그림 1(a)는 렌즈의 단면으로 렌즈 속에는 균질이며 등방형인 유전체가 채워져 있다. 중심으로 갈수록 유전체의 두께가 두껍다. 유전체의 두께가 두꺼울수록 렌즈 내의 전자파의 진행은 느리게 되어, 렌즈 테두리에서 점 전원이 여기 되면 렌즈의 반대편에서는 평면파가 렌즈의 개구를 떠나게 된다. 이러한 원리는 그림 1(b)에 잘 보여준다. 따라서 그림 1(c)에 보여진 것처럼 렌즈의 테두리 어디서 여기를 하더라도 렌즈는 동일한 특성을 갖는다. 또한 렌즈의 단면 두께는 렌즈의 총 길이에 비해 아주 작아 전체 렌즈의 부피는 아주 작다. 그리고 참고문헌 [3]에서 조사된 것과 같이 렌즈는 낮은 side lobe, 손실을 갖는다. 또한 제안된 렌즈는 다른 형의 Luneburg 렌즈와 비교해 균질이며 등방형인 유전체만을 사용하기 때문에 제작이 쉬워 차량용 레이더에 적합하다.

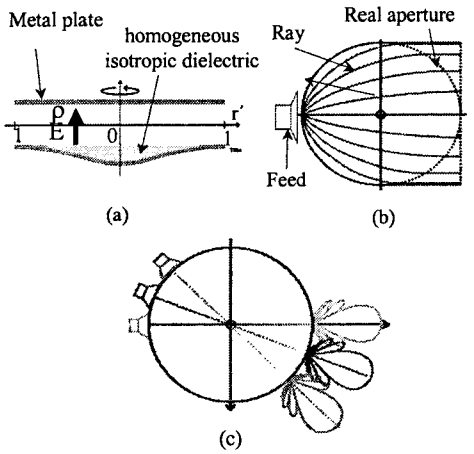


그림 1. Luneburg 렌즈 안테나. (a) 렌즈의 단면. 렌즈의 굴절율 $\sqrt{2-(r')^2}$를 위해 균질, 등방형인 유전체를 사용. (b) 렌즈의 평면파 발생원리. (c) 회전축 대칭인 렌즈의 다중빔 특성.

2.2 Digital beam forming 시스템 구성

2.2.1 시스템 모델

그림 2에는 전방의 차량을 찾는 가상의 시나리오를 나타내었다. 그림에서처럼 송수신 장치는 분리되어 있고, 원점에서 물체는 α_s의 각도를 갖고 있다.

송신 안테나의 방사 패턴이 주어진다면, 송신되는 전장은 다음과 같다.

$$E_t(r_s, \alpha_s) = A_t(r_s) \cdot C_t(\alpha_s) \cdot e^{-jkS_T} . \qquad (1)$$

여기서 $A_t(r_s)$는 거리에 따른 전장의 감쇄 성분, $C_t(\alpha_s)$는 송신 안테나의 주어진 각도에서 방사되는 값을 말한다. 그리고 전파 상수 $k=2\pi/\lambda$이며, 시간 항은 생략되었다. 그리고 거리 S_T는 $x_t << r_s$를 가정하여 근사치를 구하였다.

$$S_T = \sqrt{r_s^2 - 2r_s x_t \sin\alpha_s + x_t^2} \approx r_s - x_t \sin\alpha_s. \quad (2)$$

동일한 방법으로 수신 안테나에 수신되는 신호의 크기는 식 (1)과 (2)를 이용하여 다음과 같이 된다.

$$u_r(x, x_t) = O_s \cdot A_r(r_s) \cdot A_t(r_s) \cdot C_r(\alpha_s) \cdot C_t(\alpha_s) \cdot \cdot e^{-jk(2r_s - (x + x_t)\sin\alpha_s)}. \quad (3)$$

송신신호의 거리계산에서처럼 수신 측에서도 $x << r_s$를 가정하여 S_R의 근사치를 사용하였다. O_s는 물체의 반사되는 신호 크기를 표시한다. 따라서 식 (3)으로부터 송수신 안테나의 방사 패턴이 주어진다면 수신되는 신호의 크기를 계산할 수 있다. 또한 같은 거리에 있는 (range cell) 물체들의 경우 $A_r(r_s)$와 $A_t(r_s)$ 그리고 e^{-2jkr_s}는 상수값을 가짐으로 수신신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u(x, x_t) = O_s \cdot C_r(\alpha_s) \cdot C_t(\alpha_s) \cdot e^{jk(x + x_t)\sin\alpha_s}. \quad (4)$$

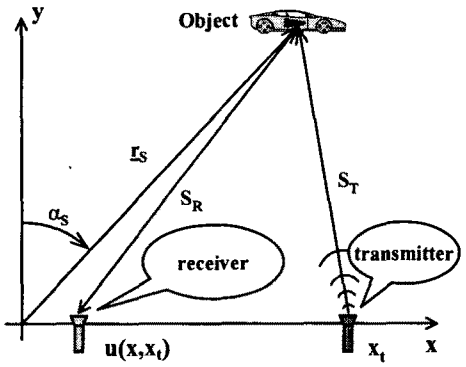


그림 2. 거리 r_s 원점으로부터 각도 α_s에 있는 물체를 탐지하는 시스템 모델.

2.2.2 가상 배열 시스템(virtual array system)으로 변환

이 절에서는 DBF기술의 핵심인 실제 시스템을 가상 배열 시스템으로 변환하는 과정을 설명한다. 아래 그림 3과 같이 송신 안테나 2개, 수신 안테나가 하나인 경우 (그림의 윗부분)를 고려해 보자. 식 (4)로부터 수신 안테나에 수신되는 전장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x_\nu, x_\mu) = O_s \cdot C_{r\nu}(\alpha_s) \cdot C_{t\mu}(\alpha_s) e^{jk(x_\nu + x_\mu)\sin\alpha_s}. \quad (5)$$

μ는 송신용 안테나의 순번을 표시하며, ν는 수신용 안테나의 순번이다. 그림 3에서는 μ=1과 2, 그리고 $\nu = 1$이다. 이러한 실제 시스템을 구현하기 위해서는 앞절에서 언급된 평형평판 Luneburg 렌즈와 같은 다중 빔 안테나를 사용하게 되면 공간과 가격의 절감이 있을 수 있을 것이다.

다음은 그림 3의 윗부분의 실제 시스템을 가상 배열 시스템으로 변환하기 위해서 식 (5)를 다음과 같이 변형한다.

$$u_n(\tilde{x_n}, \alpha_s) = O_s \cdot C_n(\alpha_s) \cdot e^{jk \cdot x_n \cdot \sin\alpha_s}. \quad (6)$$

식 (6)은 그림 3의 실제 시스템을 가상 배열 형태로 표시한 것이다. 표 1은 실제 시스템과 가상 배열 시스템 사이의 변수 변환 관계를 보인다.

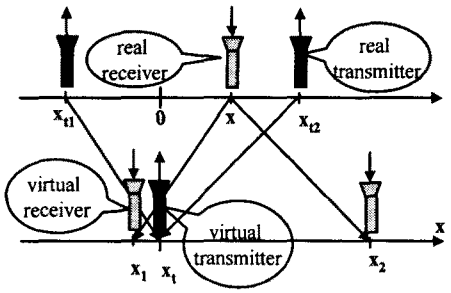


그림 3. 실제 배열 시스템을 가상 배열 시스템으로의 변환과정.

실제 시스템	가상 배열 시스템
x_ν	$\tilde{x_n} = x_\nu + x_{t\mu}$
$x_{t\mu}$	$\tilde{x_n} = 0$
$C_{r\nu}(\alpha_s)$	$C_{rn}(\alpha_s) = C_n(\alpha_s) = C_{t\mu}(\alpha_s) C_{r\nu}(\alpha_s)$
$C_{t\mu}(\alpha_s)$	$C_{tn}(\alpha_s) = 1$

표 1. 실제 시스템과 가상 배열 시스템에서의 변수변환 관계

그림 3과 표 1에서 알 수 있듯이 모든 송신용 안테나는 가상 배열 시스템에서 원점에 배치되고 방사 패턴은 균일한($C_{tn}(\alpha_s) = 1$) 것으로 된다. 그러나 수신 안테나는 가상으로 하나가 더 증가하고, 수신되는 위치도 달라져 전체 수신 배열 시스템은 훨씬 더 넓은 범위를 탐지할 수 있다. 또한 두 가상 수신 안테나 사이의 간격이 한 파장을 넘지 않는다면 두 안테나에 의한 전체 회상도(resolution)는 증가된다.

2.2.3 Luneburg 렌즈 안테나의 응용

그림 4에는 Luneburg 렌즈를 사용한 전체 시스템의 개념도를 나타내었다. 중심 주파수는 76.5GHz(λ=3.92mm), 렌즈의 크기는 15°의 3dB 대역폭을 얻기 위해서 20mm로 하였다. 그리고 스캔 각도를 ±10°로 정하였고, 탐색 가능 거리는 20~200m로 정하였다.

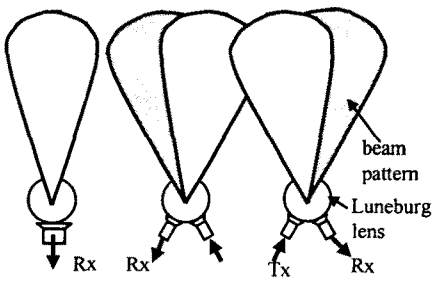


그림 4 Luneburg 렌즈를 사용한 Digital beam forming 시스템 구성도.

송신으로 두개의 빔을 사용하였고, 수신으로 세 개의 빔이 사용되었다. 따라서 Digital beam forming 기술을 적용한 가상 배열 시스템에서는 여섯 개의 수신 안테나가 있는 것과 같다.

스캔 각도 내에 N개의 목표물이 있다고 가정하면 각 목표물에 의한 반사 신호는 다음과 같다.

$$O_\alpha = \sum_{\nu=1}^{N} o_\nu \cdot \delta(\alpha - \alpha_{s\nu}). \quad (7a)$$

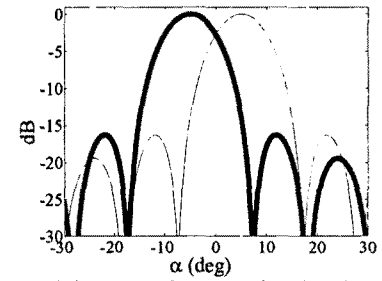
여기서

$$\delta(\alpha-\alpha_{sv})=\begin{cases}1 & \alpha=\alpha_{sv}\\ 0 & \alpha\neq\alpha_{sv}\end{cases} \quad (7b)$$

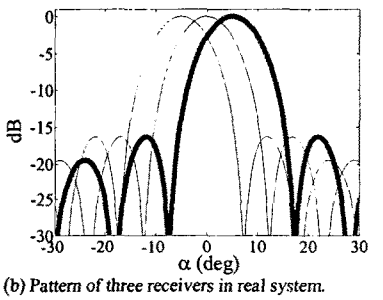
따라서 가상 위치 $\tilde{x_n}$에 위치한 하나의 수신 안테나가 수신하는 전체 수신 신호는 다음과 같다.

$$u_n(\tilde{x_n})=\sum_{\nu=1}^{M} o_\nu \cdot C_n(\alpha_{sv}) \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\cdot \sin\alpha_{sv}} \quad (8)$$

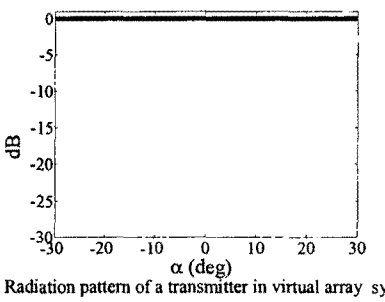
식 (8)로부터 수신 신호는 가상 안테나의 방사 패턴의 가중치와 각 목표물의 반사 신호량(RCS)에 의해서 결정됨을 알 수 있다.



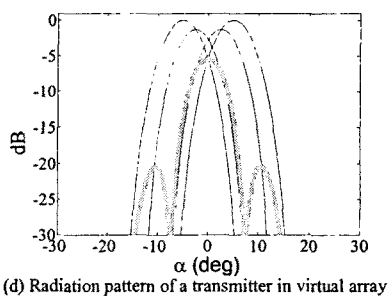
(a) Radiation pattern of two transmitters in real system.



(b) Pattern of three receivers in real system.



(c) Radiation pattern of a transmitter in virtual array system.



(d) Radiation pattern of a transmitter in virtual array system.

그림 5. 실제 시스템의 송수신 패턴 (그림 (a), (b))과 가상 배열 시스템 변환 후의 송수신 패턴.

그림 5는 그림 4의 실제 시스템 송수신 패턴과 가상 배열로 변화된 후의 송수신 패턴을 표시한 것이다. 우선 그림 5(a)는 실제 시스템의 두개의 송신 안테나의 방사 패턴을 나타낸다. 렌즈의 특성처럼 두 빔은 동일하지만 방향만이 차이가 있다. 그림 5(b)는 세 개의 수신 안테나로부터 실제 수신하는 것이다. 그림 5(c)는 표 1에서 보였던 것과 같이 전 영역에서 동일한 값을 갖는 균일(isotropic)한 특성을 갖는다. 최종적으로 가상 배열 수신 측에서는 송신 빔의 수와 수신 빔의 수를 곱한 수만큼 가상의 빔이 재배열된다. 따라서 전체 시스템은 높은 해상도를 가질 뿐만 아니라 넓은 대역에서 탐색이 가능하게 된다.

3. 결 론

가상 배열 시스템을 구현하는 Digital beam forming 기술을 사용한 차량 충돌 방지용 레이더 개념을 소개하였다. 기존 시스템에서의 하드웨어 복잡성을 줄이면서 고해상도를 얻을 수 있음을 보였고, 또한 넓은 범위에서의 목표물 탐색이 가능함을 보였다. 향후 계획은 알고리즘 관점에서 제안 된 기술을 검증하고, 구현하고자한다.

[참 고 문 헌]

[1] R. Schneider, *Modellierung der Wellenausbreitung fuer ein bildgebendes Kfz-Radar*, Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany, 1998.

[2] J. Wenger, "Automotive mm-wave radar: status and trends in system design and technology", IEE Colloquium on Automotive Radar and Navigation Techniques, London, UK, Feb. 1998, pp. 1/1-1/7.

[3] Y. J. Park, *Applications of Photonic bandgap structures with arbitrary surface impedance to Luneburg lenses for automotive radar*, Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany, 2002.

[4] M. Younis, A. Herschlein, Y.-J. Park, and W. Wiesbeck, "A parallel-plate Luneburg lens sensor concept for automotive cruise control applications", *Proc. European Microwave Conference EuMC01*, vol. 1, pp. 339-342, 2001.