

## 위성항법수신기용 적응배열 안테나의 빔 형상 조정에 관한 연구

A Research on the Beam Pattern Control of Adaptive Array Antenna for GPS  
Receiver

안 승 관\*                      이 상 정\*\*  
Ahn, Seung-Gwan              Lee, Sang-Jeong

### ABSTRACT

In this paper, the design, construction and basic characteristics of an electronically adaptive array antenna for the GPS receiver is described. The susceptibility of the GPS signals to the interference is of concern to the GPS user community. Because of the low received power of the GPS signals, outages can easily occur due to the unintentional interference and the easily obtainable low cost GPS jammer denying access to the GPS signals. We propose a technique of the adaptive array antenna that detects the GPS interference sources and controls the null beam pattern only toward the jamming sources to acquire GPS navigation data after acquisition and tracking of the GPS signals.

주요기술용어(주제어) : GPS(위성항법 시스템), Adaptive Array antenna(적응배열안테나), Beam Pattern Control(빔형상조정)

### 1. 서론

GPS(Global Positioning System)는 고도 약 20,200 km에서 운용되는 24개의 인공위성에서 전송되는 항법메시지와 송신하는 신호의 전달시간으로부터 구해지는 의사거리를 이용하여 항체의 위치, 속도 및 시각을 제공하는 시스템이고, 위성항법시스템에는 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS(GLObal Navigation

Satellite System), 유럽의 Galileo가 있다. GPS 위성에서 송신되는 위성항법 신호는 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 변조(Modulation) 기술을 이용한 CDMA(Code Division Multiple Access) 코드분할 다중접속 방식으로 설계되었고, 여기서 직접열(DS)은 신호를 GPS L1 주파수 1.57542GHz 인 반송파로 변조시키고 이를 다시 CA코드인 경우 1.023MHz, P코드인 경우 10.23MHz인 고속(광대역) 확산신호를 곱하여 변조하는 것이며, 대역확산기법(SS)은 신호를 전송할 데이터 대역폭(Bandwidth)보다 상대적으로 넓은 대역폭으로 신호전력밀도를 낮춰 전송하고, 수신 신호의 전력레벨이 잡음수준 이하로 유지되게 함으로써 최소의 검출율을 갖도록 하여 채

† 2006년 2월 14일 접수~2006년 6월 5일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* 충남대학교(CNU)

주저자 이메일 : ahnseung@add.re.kr

널간 서로 낮은 상관특성을 갖으며, 동일한 의사잡음 코드(PRN)로 수신된 신호를 복조(Demodulation)할 수 있는 기술이다. 위성으로부터 전달된 초고주파 항법신호를 이용하는 위성항법 방식은 위성으로부터 송신하는 신호전력이 지구상에서 극히 낮은 수준인 -160dBm으로 위성항법수신기의 안테나에 인가되므로 각종 통신전파 신호들 뿐 아니라 외부의 약한 적대적 간섭신호에 의해서도 쉽게 수신불능 현상을 나타낸다<sup>[6]</sup>. 이러한 문제점을 경감시키기 위해 위성항법 시스템에서는 간섭신호를 항체의 안테나, 재밍대응 신호처리기 및 위성항법수신기분야에서 처리하며, 이 중에서 물리적으로 조정하는 것 없이 사용자가 원하는 방향으로 안테나 빔 형상을 전기적으로 조정하는 안테나 이용 기술이 가장 우수한 대재밍(AJ) 성능을 갖는다<sup>[1]</sup>.

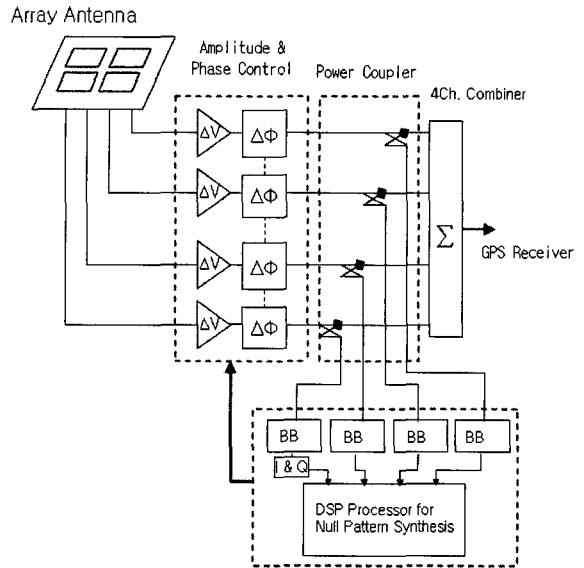
본 논문에서는 기존의 GPS 위성항법수신기에 적용 가능한 적응배열 안테나 시스템을 설계하고, 재밍 방향에만 안테나 빔 형상이 널(null)되도록 하기 위해서 재밍 소스와 안테나 빔 형상의 널관계에 대한 반복 실험을 통하여 PC에 저장된 자료를 분석하고 그 결과에 따라 최적의 값을 선정 후 안테나 빔 형상 조정기에 입력하여 안테나 빔 형상이 재밍소스 방향으로만 널(null)되도록 전기적으로 조정하는 적응배열 안테나 시스템을 구현 하였다.

## 2. GPS 적응배열안테나 시스템 설계

설계된 GPS 적응배열안테나의 전체 시스템은 4개의 GPS안테나를 사용하였고, 각 채널별로 GPS L1 안테나, RF신호증폭기(LNA), I/Q변조기(Modulator), 기저대역(Baseband) 수신기(Receiver), AD(Analog to Digital) 변환기 및 진폭/위상조정기를 구성한 후, 안테나 빔 형상에서 널(Null)을 형성하기 위해 각 채널을 합성하는 디지털 신호처리기(DSP)부 및 PC 인터페이스부로 구성되어 있다.

GPS 적응배열 안테나 시스템의 구성도는 그림 1 이고, 기능별로 표시하였다.

GPS 적응배열안테나는 L1대역 마이크로 스트립 패치를 사용한 안테나를 이용하여 4소자(4-Element)



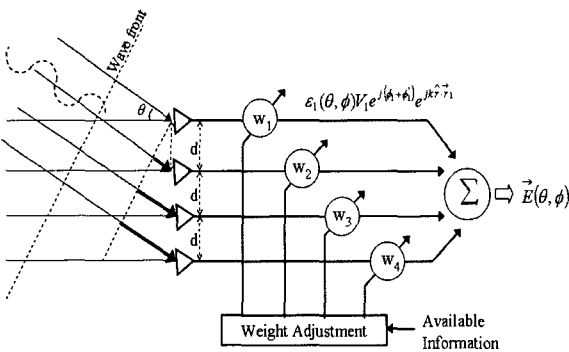
[그림1] GPS 적응배열안테나 시스템 구성도

로 설계 했으며, 이러한 구조는 안티재밍 기능을 갖는 안테나를 최대한 소형화함으로써 적용 대상을 폭 넓게 선정 할 수 있고, 향후 안테나 스택(Stacking) 기법을 이용하여, L2 대역까지 포함하는 광대역의 위성항법수신 안테나로 변경이 용이하다는 장점을 갖는다<sup>[3]</sup>. 본 시스템에 이용된 적응배열 안테나는 GPS L1 신호의 특성에 맞추어 30dB급 LNA(Low Noise Amplifier)를 내장시킨 액티브 안테나 4개로 구성되어 있고, 4개의 패치(Patch)간의 간격은 반파장( $\lambda/2$ )보다 약간 좁은 약 8.5cm로 이루어진 정방형의 평면 구조를 채택함으로써 상호간섭(Mutual Coupling)현상을 최소화 시켰다<sup>[4]</sup>.

4소자 GPS 안테나에 입사된 RF(Radio Frequency) 신호는 위상(Phase) 성분과 진폭(Amplitude) 성분으로 구분될 수 있으며, 그림 1의 RF신호 커플러(Coupler)를 통하여 GPS 위성항법수신기로 전달되는 신호의 일부를 분기한 후, 분석 및 처리를 위해서 시스템의 RF/IF 신호는 수신부(Receiver)쪽으로 전송된다. 입력 신호의 위상특성을 분석하기 위하여 RF 입력신호는 I/Q변조기의 직교위상처리기를 통해, 기저대역(Baseband) 주파수 형태의 직교위상(Quadrature) 신호로 변환된다.

이후 디지털 신호처리 회로에서는 주파수 하향 변

환된 신호를 ADC(Analog to Digital Converter)를 이용하여 I/Q 신호에 대한 샘플링(Sampling)을 수행하여, 4채널의 입력 신호의 위상 차 특성을 계산하여 안테나 널(Null)형상 형성을 위한 기준신호로 이용한다. 이러한 과정은 그림 2를 통해서 적응배열 안테나로 입사된 신호에 대한 방향각 탐지원리 및 각 채널을 통해서 전송되는 전자파 신호에 대한 위상변위 및 합성 과정을 표시하였다.



[그림 2] GPS 적응배열안테나 개념도

서로 인접한 안테나를 통하여 입사되는 파(wave)의 방향을 측정하기 위해서, 각 소자(element)에  $\theta$ 의 각으로 재밍 신호가 여기(excitation) 된다고 가정하면, 소자간의 간격이  $d [cm]$ 인 경우에는 각 채널간에  $l = d \sin \theta$  정도의 경로차가 존재한다. 이러한 차이는 각 파(wave)의 위상차(phase-difference)를 이용해서 측정 가능하며, 측정된 각 소자의 파의 위상차(wave phase)는  $\phi = (l/\lambda) \cdot 2\pi$ 로 표시하고, 위상차 및 경로차에 대한 관계식은 식 (1)과 같다. 여기서  $k$ 는 파수(Wave number)  $2\pi/\lambda$ 이다.

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta = kd \sin \theta$$

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\phi_2 - \phi_1}{kd} \right) \quad (1)$$

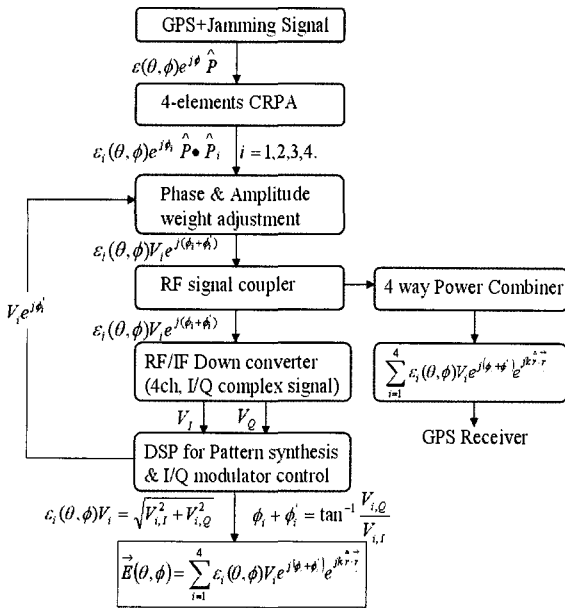
본 시스템의 동작원리를 간단히 정리하면, 각 소자로 입사되는 재밍 신호원(source)의 방향을 탐지하기 위해서는 먼저 DOA(Direction Of Arrival) 각을 결

정하기 위한 위상 측정치를 측정 장비로 측정할 수 있으나 매년 측정 장비로 측정하는 번거로움을 해결하기 위해 4소자 적응배열 안테나에서 획득된 디지털 I/Q 샘플간의 위상차(phase-difference) 정보로 계산할 수 있으며, 결국 계산된 위상차 값은 재밍 신호의 경로차(path delay)로 환산되어, 재머의 도달 방향을 예측할 수 있다. 이후 특정 방향으로만 널 형상을 형성하기 위해서 각 소자(element)의 위상(phase) 및 진폭(amplitude)을 DAC(Digital to Analog Converter)를 이용하여 측정된 값을 제어모듈을 통해 제어할 수 있으며, 이는 0~1000mV 범위의 독립된 4채널의 아날로그 신호를 이용하여 적응배열 안테나의 형상을 특정 재밍 신호방향으로만 최대의 널깊이(null depth)를 형성할 수 있도록 한다.

적응배열 안테나를 통하여 입사된 RF 신호는 그림 1처럼 RF 커플러(coupler)를 통해 GPS 수신기와 기저대역 수신기로 분기된다. 기저대역 수신기로 입사된 신호는 동위상(In-phase) 신호와 직교위상(quadrature)의 기저대역 신호로 분리되고, 디지털신호처리부로 전달된 후 I/Q 제어모듈로 입사된다. 입사된 RF 신호에 맞추어 제어 가능한 4채널을 DAC(Digital to Analog Converter)를 이용하여 바이어스(bias) 전압을 인위적으로 가변함과 동시에 그림 1의 시스템의 위상과 진폭 조절기에 입력되는 RF 신호의 가중치(weight)가 인위적으로 조정됨에 따라 변화하는 합성된 안테나의 형상을 측정함으로써 재밍 환경에서 GPS 적응배열 안테나의 성능을 확인 할 수 있다<sup>[5]</sup>. 이러한 과정을 통해서 재밍 신호의 획득 및 입사각 측정이 가능하며 특정 재머 방향으로만 널 형상이 가능하다.

앞서 설명한 내용은 안테나 신호합성과 관련된 RF 신호의 흐름도(flow)인 그림 3을 통하여 이해할 수 있다. 먼저 GPS 신호와 재밍 신호는 4소자 안테나에 각각 필드벡터(Field vector)  $\epsilon_i(\theta, \phi) e^{jk \cdot \hat{r}_i}$ 로 입사되며 경로 차를 포함하게 된다.

그림 3의 신호 흐름도에서, GPS 신호와 재밍 신호로 합성된 4개의 독립된 RF신호 1,2,3,4는 적응배열 안테나를 통해 GPS 신호와 재밍 신호가 동시에 수신되고 있으며, 각 소자를 거친 후 4채널의 I/Q 신호변환기의 입력신호로 이용된다. 이후 디지털 신호처리

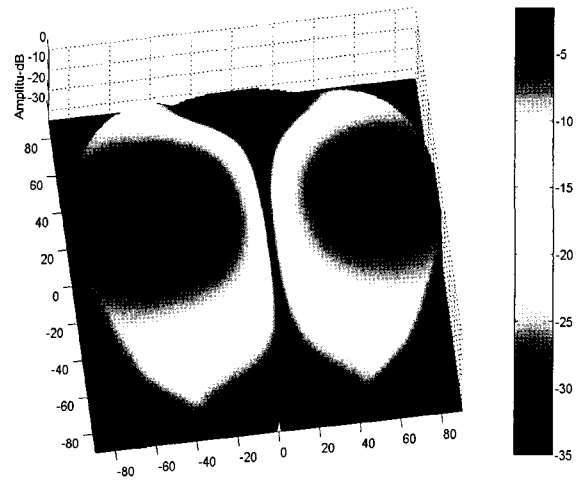


[그림 3] GPS 적응배열안테나 시스템 RF신호 흐름도

과정을 통해서 현재의 RF 입력신호 상태의 진폭 성분 및 위상성분의 특성에 따른 최적의 빔 형성 형상을 위한 가중치 값을 위상 및 진폭 조정기(Phase & Amplitude weight adjustment)에 전달하게 된다. 이후 특정 재머 방향으로만 이득을 감쇄시킨 GPS적용 배열 안테나 신호는 4채널 동위상(Coherent) 전력합성기(Power Combiner)를 통해서 GPS 수신기로 전달되는 구조로 되어있다. 이러한 일련의 과정을 RF 신호의 흐름인 식 (2)와 같이 4개의 안테나에 대해서 독립된 신호의 합성형태로 표현하여 해석할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}(\theta, \phi) &= \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i(\theta, \phi) V_i e^{j(\phi_i + \hat{\phi}_i)} e^{jk\hat{r}_i^{\rightarrow}} \\ &= \varepsilon_1(\theta, \phi) V_1 e^{j(\phi_1 + \hat{\phi}_1)} e^{jk\hat{r}_1^{\rightarrow}} + \varepsilon_2(\theta, \phi) V_2 e^{j(\phi_2 + \hat{\phi}_2)} e^{jk\hat{r}_2^{\rightarrow}} \\ &+ \varepsilon_3(\theta, \phi) V_3 e^{j(\phi_3 + \hat{\phi}_3)} e^{jk\hat{r}_3^{\rightarrow}} + \varepsilon_4(\theta, \phi) V_4 e^{j(\phi_4 + \hat{\phi}_4)} e^{jk\hat{r}_4^{\rightarrow}} \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 과정을 통해서 특정 재머 방향으로만 널빔 형상이 가능한 적응배열 안테나 빔 형상은 그림 4와 같은 안테나 형상 시뮬레이션 결과를 확인하면 양쪽

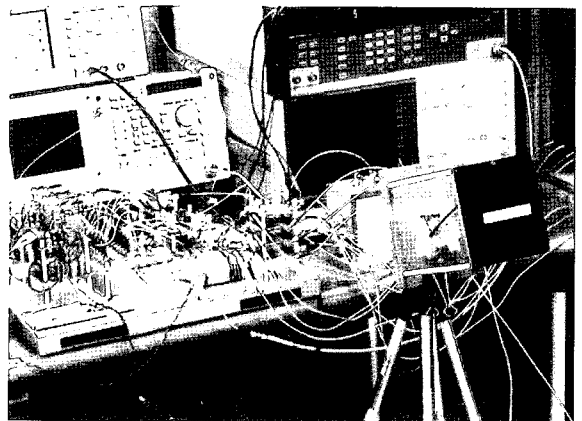


[그림 4] GPS 적응배열안테나의 널(null) 빔 형상

방향으로 대칭인 리본(Ribbon) 형태의 널을 형성할 수 있음을 예측할 수 있다.

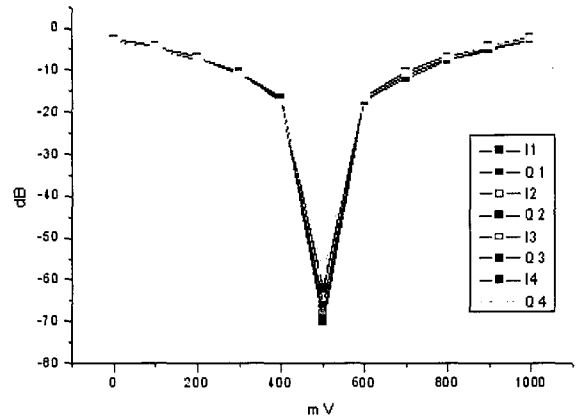
### 3. GPS 배열 안테나 시스템 구성

본 논문에서는 제작된 4소자 배열 안테나에 대한 널 패턴을 측정하기 위하여 특정 방향으로 재머 소스를 인가한 후 최종적으로 합성된 안테나 널을 스펙트럼분석기(spectrum analyzer)를 이용하여 약 20dB 이상의 재밍 신호 감쇄효과를 확인하기 위하여 그림 5와 같이 시스템을 구성하였다.

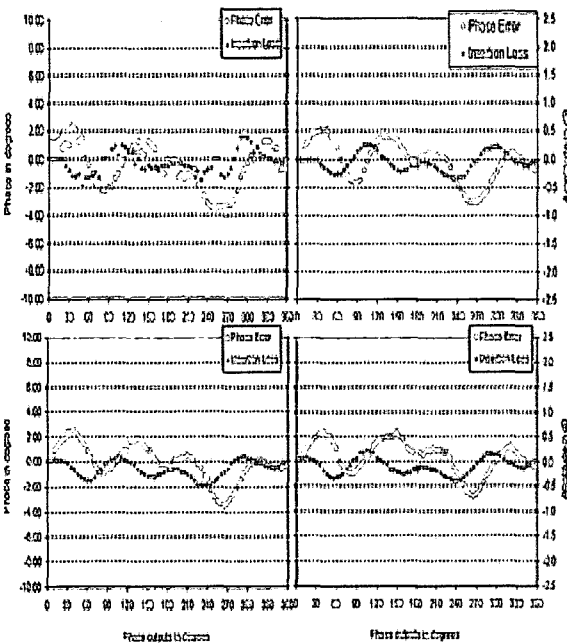


[그림 5] GPS 적응배열안테나 시스템 시험

본 시스템에 적용된 I/Q제어신호는 8bit급의 DAC를 이용하여 디지털 신호로 샘플링하여 구현하였으며, 제어모듈(module)에 대한 특성 분석 및 교정을 위해서 4채널로 구성된 전체 시스템에 대한 위상 및 크기를 네트워크 분석기로 측정된 후, 제어모듈을 이용하여 DAC 아날로그 전압에 따른 신호의 크기 변화를 확인한다. 이후 초기 위상 정렬을 1번 채널을 기준 값으로 정한 후 다른 채널에 대해서도 전기적인 특성을 균일 하게 맞추기 위해서 반복적으로 교정(calibration)을 수행한다. 그림 6을 통해서 각 채널의 제어모듈의 위상특성을 표시하였으며, 각 채널간 유사한 위상 값을 표시함을 알 수 있다.



[그림 7] 제어모듈의 신호감쇄 vs 가변전압



[그림 6] 4채널 제어모듈의 위상특성

각 안테나 소자들로부터 입사된 GPS 와 재밍 신호는 제어모듈로 입사되어 RF 신호에 대한 위상뿐만 아니라 진폭까지 조정한다. 이는 신호 크기를 연속적으로 가변 할 수 있음을 의미한다. 그림 7을 통해서 각 채널에 대해서 신호의 크기를 최대 70dB까지 가변 할 수 있음을 알 수 있다.

안테나 빔 형성 형성의 핵심 모듈인 제어모듈은 마이크로디바이스(Micro-Device)사의 I/Q 모듈레이터

(RF2483)를 이용하여 직교 위상 벡터를 조절하였고 보다 안정적인 신호 수신을 위하여 리시버(Receiver) 쪽에 내장형 AGC를 이용하였다. I/Q 모듈레이터 (RF2483) 모듈의 제어는 DAC 컨트롤러를 PCI 상에 구현하여 0~1000mV의 바이어스 전압을 PC를 통해서 인가하여 적응배열 안테나를 제어할 수 있다.

#### 4. 재밍에 따른 적응배열안테나의 빔 형성의 시험 결과

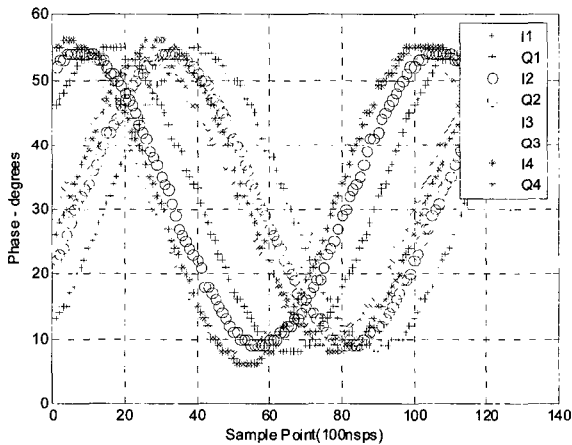
적응배열 안테나의 특성 시험을 위해서 적응배열 안테나 소자를 직경이 20cm 정도의 원형 금속판에 부착시킨 후 기본적인 안테나 성능인 안테나의 형상 및 이득을 적응배열 안테나에 대해 안테나 성능을 측정한다.

각 4채널의 모듈(module)로 구성된 적응배열 안테나를 지면과 직각이 되도록 한 후 1m 정도의 높이에 고정시키고, 재밍 송신 안테나와 GPS 적응배열 안테나간의 거리를 2m로 유지하였다. 그리고 CW 신호발생기를 이용하여 GPS L1 주파수인 1.57542GHz로 설정한 후 GPS L1 협대역 재밍 소스를 적응배열 안테나 쪽으로 인가한다. 적응배열 안테나 시스템에서 수신된 재밍 전력과 결합 모듈의 출력을 스펙트럼 분석기로 측정하여 재밍 전력과 적응배열 안테나의 널 형성의 관계를 분석한다.

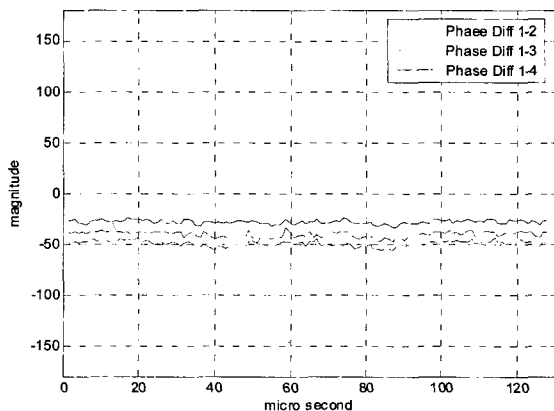
이후 각 채널에서 안테나 널 형성 제어를 위해서

I/Q 입력 제어 전압은 원하는 안테나 형상 합성과 일치하는 값을 인가하고, 각 단계별로 수행된 시험에 대한 I/Q 신호의 출력 값과 측정된 위상차를 그림 8 과 그림 9에 그래프로 표시하였다.

그림 8은 안테나 형상 합성 이전의 신호 상태를 적용배열 안테나 시스템의 리시버(receiver)에서 측정된 결과이고, 그림 9는 각 채널을 채널1에 대한 빔 형상 조정 이전의 I/Q 위상차이다. 이후 GPS L1 적용배열 안테나의 기본 형상을 기준으로 특정 재머 방향으로 널 형상을 생성하기 위해서 제어모듈을 이용하여 측정된 재머 방향으로만 재밍 신호 감쇄를 위해 위상 조정이 필요하고, 요구되는 위상제어 값은 PC를 통해서 입력해주면 된다.

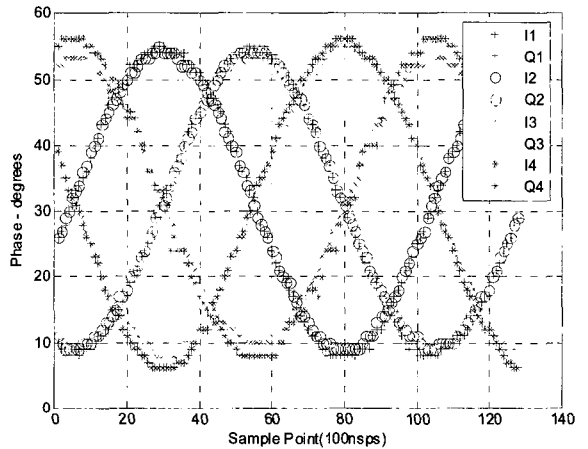


[그림 8] 빔 형상 조정 이전의 I/Q 출력값

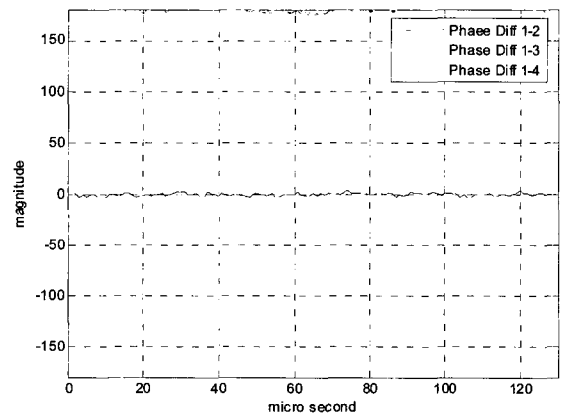


[그림 9] 빔 형상 조정 이전의 I/Q 위상차

이렇게 조정된 위상 및 진폭에 의해서 합성된 안테나 형상에 대한 I/Q 신호 상태는 그림 10 및 그림 11과 같이 측정 되어진다. 그림 10은 안테나 형상 합성 이후의 신호 상태를 적용배열 안테나 시스템의 리시버에서 측정된 결과이고, 그림 11은 각 채널을 채널1에 대한 널 형상 조정 이후의 I/Q 위상차이다.



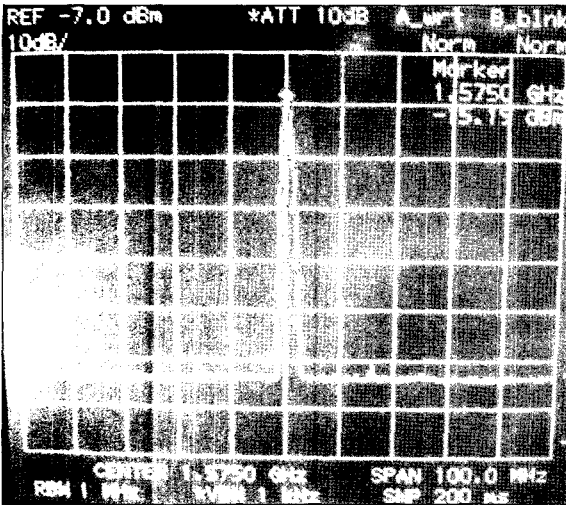
[그림 10] 널(null)형상 조정 이후 I/Q 출력값



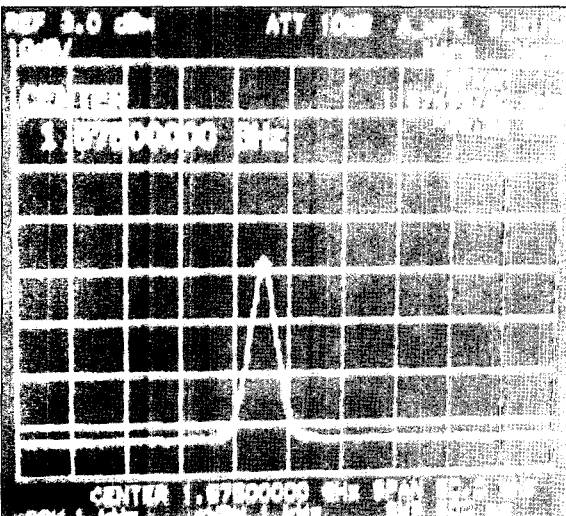
[그림 11] 널(null) 형상 조정 이후 I/Q 위상차

마지막으로 GPS L1 적용배열 안테나의 재밍 신호 감쇄 특성을 확인하기 위해서 GPS 수신기 입력포트 쪽에 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 이용하여 빔 형상 조정 전과 후에 측정된 재밍 신호 크기 차이를 측정하여 적용배열 안테나의 널 깊이(null depth)의 생성 정도를 알 수 있으며, 측정 결과 특정

방향으로만 약 21dB 정도의 성능을 그림 12와 그림 13을 통하여 확인하였다.



[그림 12] 널 형성 조정 전 출력측정결과



[그림 13] 널 형성 조정 후 출력측정결과

## 5. 결론

본 논문에서는 4소자 GPS L1 적응배열 안테나에 인가되는 재밍 신호를 제어모듈로 조정해서 안테나 빔 형상을 형성하는 연구를 수행하였으며, GPS L1주

파수에 해당되는 협대역 재밍 신호를 재밍 장비 대신에 CW 신호발생기로 GPS L1 적응배열 안테나에 인가하였고, 인가된 재밍 신호 방향으로만 안테나 널 빔 형상을 형성하기 위해서 안테나 빔 형성 제어모듈의 위상 및 진폭 성분을 조정하여 널 생성시킴으로써 재밍 신호의 크기를 경감시킬 수 있었다.

본 논문에서 수행한 시험결과는 재밍신호 방향으로만 약 21dB 정도의 널 깊이(null depth)를 형성하였고, 추후에 제어모듈에 시간영역과 주파수영역의 기법을 추가하여 수행할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Dang Mingjie, Peng Xinjian, Yu Fang, Liu Jianghong, "Research on the Technology of Adaptive Nulling Antenna Used in Anti-Jam GPS", Xi'an Research Institute of Navigation Technology, January, 2001.
- [2] Ken Falcone, George Dimos, Chun Yang, "Small Affordable Anti-Jam GPS Antenna (SAAGA) Development", ION GPS '99, 14-17 September, 1999, Nashville, TN.
- [3] Hung Ly, Paul Eyring, Efraim Traum "Design, Simulation and Testing of a Miniaturized GPS Dual-Frequency(L1/L2) Antenna Array", Proceedings of ION GPS 2002, September 2002.
- [4] Chris W. Reed, Robert Van Wechel, Ivan Johnston, Brian Baeder, Edwin Hogan, "FaSTAP: A Scalable Anti-Jam Architecture for GPS", IEEE, 2004.
- [5] Andy Peczalski, Jeff Kriz, Stephen G. Carlson, Steven J. Sampson, "Military/Civilian Mixed-Mode Global Positioning System Receiver (MMGR)", IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004.
- [6] 김준오, 배준성, 박홍원, "GPS 재밍 시뮬레이터를 이용한 수신기 대재밍 성능분석", 제11차 GNSS 워크샵, 2004, 11월.