

I/Q 벡터 모듈레이터를 이용한 GPS CRPA 패턴 제어기술

A Technology on the GPS CRPA Pattern Control Using the I/Q Vector Modulator

김준오*
Kim, Jun-O

배준성*
Bae, Jun-Seung

ABSTRACT

This paper describes the antenna based GPS anti-jamming technology called CRPA(Controlled Reception Pattern Antenna), which used 2×2 array elements. In this system, the main functions are the antenna complex weight control and the GPS digital I/Q VM(Vector Modulator)^[1,2]. To update the VM's I/Q complex weights, the PC based DAC(Digital to Analog Converter) module was also used and the two analog output voltages were applied to the 2×2 array elements to synthesize the null pattern. In the study, we also simulated the 2×2 GPS array null patterns to compare the null depth with experimental results. The VM was also modified at the frequency of 1.575GHz for the GPS L1 and controlled by the PC based VM software.

주요기술용어(주제어) : GPS(전자구 위치 확인 시스템), CRPA(패턴제어용 GPS안테나), VM(벡터변조기), GPS Jamming (GPS 방해신호), J/S(위성신호에 대한 재밍 신호크기, 재밍마진)

1. 머리말

군사적 목적으로 GPS를 이용하기 위해서는 보다 정밀하고 안정적인 위치확인 시스템이 요구되며, 특히 적국의 인위적인 재밍 신호 의해서 야기되는 위성 항법수신기의 수신능력약화 및 동작불능 상태는 심각한 문제이다. 이는 GPS신호가 지표면에서 약 -130 dBm 정도의 미약한 신호로 GPS 안테나에 수신되는 환경 및 30dB 이하의 GPS 수신기의 고유 재밍마진(jamming margin)으로는 인근 방송국 송출신호의 고조파(harmonics)에 의해서도 쉽게 간섭영향을 받는

다는 사실에 근거한다. 현재, 이러한 GPS 수신기 운용에 영향을 주는 재밍신호 극복을 위한 다양한 기법이 개발되고 있으며, 그 중 적응배열안테나(adaptive array antenna) 기반의 CRPA(Controlled Reception Pattern Antenna) 방식을 이용하는 것이 가장 뛰어난 재밍대응 능력을 갖는다^[3]. 이 기술은 안테나의 빔형성(beam-forming) 및 널조향(null-steering) 기법을 이용한다^[4]. 본 논문에서는 위성항법기술에서 많이 적용되는 널조향 기법과, 이의 구현을 위해 적용한 벡터모듈레이터 및 빔패턴 분석내용을 제시한다. 논문의 구성은 머리말에 이어, 2장에서 GPS 재밍영향 및 CRPA 시스템, 3장에서 벡터모듈레이터 기술, 4장에서 이를 이용한 패턴제어 결과를 분석하며, 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

† 2006년 5월 23일 접수~2006년 8월 28일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : HL5PUE@hanmail.net

2. GPS 재밍 및 CRPA 시스템

가. GPS 재밍

GPS 수신기 재밍에 필요한 전력은 식 (1)에 표시된 위성신호와 재밍신호의 관계식을 이용하여 계산되어진다.

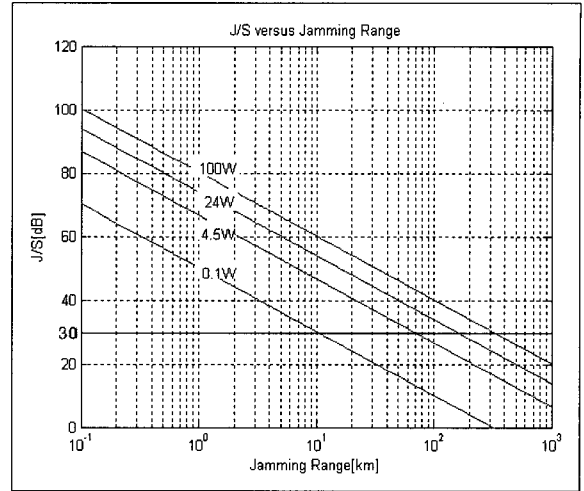
$$J = S + J/S - G_{TX} - G_{RX} + PL \quad (1)$$

식 (1)에서 J 는 재밍전력, S 는 GPS 신호의 크기, J/S 는 재밍마진(margin), G_{TX} 는 재머 송신 안테나 이득(gain), G_{RX} 는 GPS 수신안테나의 재머 방향으로의 이득, 마지막으로 PL (path loss)은 자유공간상의 경로손실이다. 수신되는 위성신호의 세기 S 는 일반적으로 L1신호의 경우 지표면에서 약 -130dBm 정도이며, 재밍마진 J/S 는 식 (2)에 의해서 계산되어진다. 이는 BPSK(binary phase shift keying)에서 요구되는 SNR_{out} 과 수신기 내부 손실(loss)에 해당하는 L_{sys} 를 이용하여 계산이 가능하다^[5].

$$\text{Jamming Margin} = G_p - [L_{sys} + (\frac{S}{N})_{out}] \quad (2)$$

예를 들면, 기저대역(baseband)의 처리이득(processing gain) G_p 가 43dB , BPSK시스템의 SNR_{out} 을 11dB , L_{sys} 를 2dB 미만이라고 하면, GPS 수신기의 J/S 는 약 30dB 정도가 된다. 이 값은 위성에서 수신되는 GPS 신호보다 30dB 높은 협대역 간섭 신호가 존재하면, 정상적인 위성항법용 데이터 복조(demodulation) 기능을 수행할 수 없다는 것을 의미한다. 위의 내용을 기반으로 하여, GPS 수신기의 재밍대응 능력에 따라서 분석된 재밍 범위는 그림 1을 통하여 그래프로 표시하였다.

그래프에서, 0.1W 의 실효등방성 복사전력 EIRP(Effective isotropic radiated power)인 GPS 재머(jammer)를 이용하여 지상에서 재밍시험을 수행한다고 가정한다. 이러한 조건에서 상용 GPS 수신기에 대한 재밍 범위를 계산하면 약 10km 정도임을 그래프를 통하여 알 수 있다. 이는 약 30dB 의 J/S 를 갖는 GPS 수신기를 기준으로 계산 결과로서, 위성신호



[그림 1] GPS수신기 J/S 에 따른 재밍범위

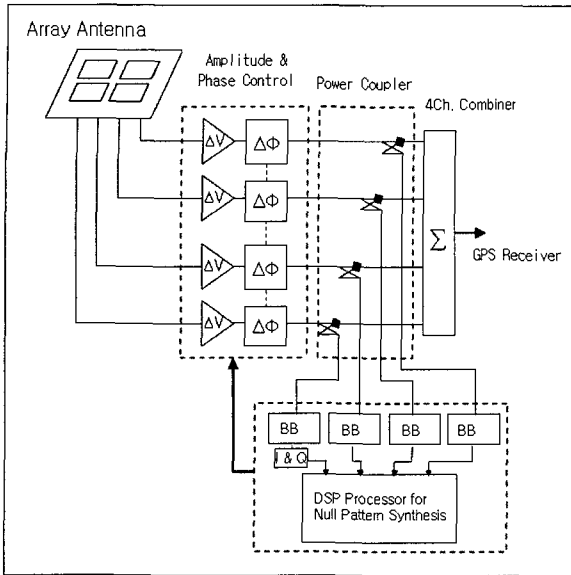
의 정상적인 추적(tracking)을 방해하여 위성항법이 불가능한 거리를 표시한 것이다.

또한, 향상된 J/S 의 재밍마진을 갖는 수신기인 군용 P(Y)코드 수신기 또는 강력한 재밍대응 기법이 적용된 GPS용 CRPA를 이용한 경우 최대 120dB 까지의 J/S 를 확보 할 수 있으며, 이는 미국 군용 GPS 수신기의 재밍대응 기술의 목표로 알려져 있다.

나. CRPA(controlled reception pattern antenna)

일반적으로, 위상배열안테나(phased array antenna)는 시스템에서 미리 결정된 방향으로 안테나 빔을 만들어 이용하지만, CRPA 구조의 GPS 위성항법용 적용 배열테나는 각 안테나 소자(element)로부터 수신된 신호들을 실시간으로 처리하여, 주어진 재밍 신호에 방향에 따라 안테나 패턴을 적용시킨다. 이는 원하지 않는 간섭 신호원인 SONI(Signal Of Not Interest) 방향으로는 안테나 널(null) 패턴을 합성하고, 동시에 원하는 신호인 SOI(Signal Of Interest) 방향으로는 빔(beam)을 형성하여, 시스템 성능의 기본 변수인 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)을 최대화 시킬 수 있는 안테나 기술이다.

이러한 배열안테나의 형태는 사용된 안테나의 소자(element)의 종류, 공간에서의 배치구조(geometry), 안테나 위상중심(phase center) 그리고 각 소자에 적용되는 가중치(weight)인 진폭(amplitude)과 위상



[그림 2] GPS L1 CRPA 시스템 구조도

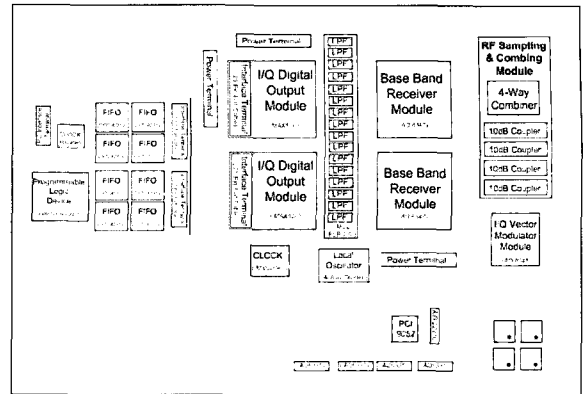
(phase) 성분을 이용하여 다양한 구조로 설계가 가능하다.

본 연구를 목적으로 제작된 GPS L1용 CRPA 시스템은 2x2 배열안테나 구조로 되어 있으며, 그림 2에 CRPA 운용시스템의 전체 구성을 표시하였다. 그림의 좌측으로부터 GPS L1용 4소자 배열안테나, 진폭 및 위상제어기, 전력분배기, 전력합성기를 비롯하여 아래 부분에는 디지털 신호처리기 및 VM제어기 블록으로 구성된다.

각 기능블록(functional block)에 대한 내용은 그림 3에 표시된 블록다이어그램을 이용하여 간단히 설명한다. 배열 안테나를 통하여 입사된 RF(Radio Frequency) 신호는 10dB RF커플러(coupler)를 통해서 GPS 수신기와 별도의 기저대역(baseband) 수신기(receiver)로 분기된다. 동시에 기저대역 수신기로 입사된 신호는 동위상(I) 및 직교위상(Q)성분으로 분리된 후 4배 오버샘플링(over-sampling) 되어 각 채널의 시간지연 성분인 위상(phase)을 저장한다.

이후 FIFO(First In First Out) 메모리에 저장된 4 채널 디지털 샘플을 이용하여 식 (3)의 위상지연 관계식을 적용 후 재밍 신호의 도달각인 DOA(Direction Of Arrival)를 구한다^[6].

식 (3)에서 서로 인접한 안테나를 통하여 입사되는



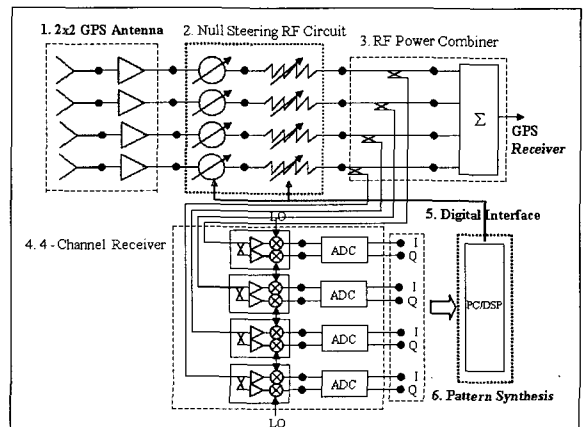
[그림 3] CRPA 시스템 세부 모듈 구성도

파(wave)의 방향을 측정하기 위해서는 임의의 도달각(DOA)으로 안테나 소자에 인가된 재밍 신호에 대해서, 배열 간격이 $d[cm]$ 인 경우에는 각 채널 간에 $l = d \sin \theta$ 의 경로 차가 존재하며, 4채널의 위상차(phase-difference)를 이용해서 재밍 신호의 방향을 계산할 수 있다.

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

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{kd} \right) \quad (3)$$

여기서, k 는 파수(wave number) $2\pi/\lambda$ 를 의미한다. 4채널의 위상 지연(delay) 자료를 처리하여 재밍 신호의 도달 각(DOA)을 계산한 후, CRPA 시스템



[그림 4] GPS용 CRPA 시스템 블록도

에서는 특정 방향으로의 안테나 널(null) 패턴 합성을 위한 과정이 필요하며, 이러한 기능을 수행하는 장치는 그림 4에 “Null Steering RF Circuit”이라고 표시된 VM 모듈이 담당한다.

“PC/DSP”라고 표시된 DAC에서는 VM 동작에 필요한 각 안테나 소자의 위상 및 진폭 신호를 발생시켜 VM을 직접 제어하는 구조로 되어 있다. 이는 4채널의 배열 소자에 직접 복소가중치(complex weight)를 아날로그 전압 형태로 인가한다. 이 과정에서 CRPA 시스템의 적용환경에 따라 다양한 제어기법의 개발 및 적용이 가능하다.

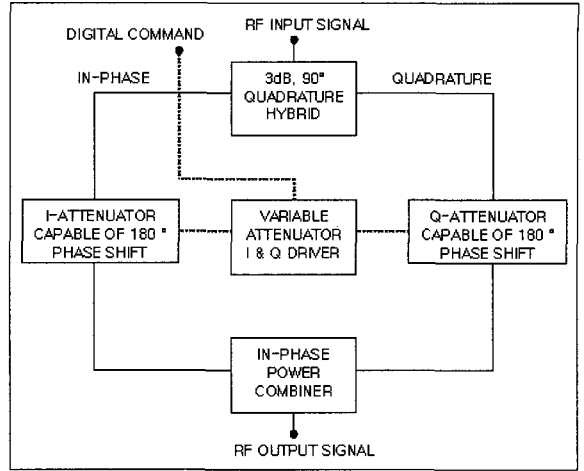
3. 안테나 패턴 제어기술

가. I/Q 벡터모듈레이터(I/Q Vector Modulator)

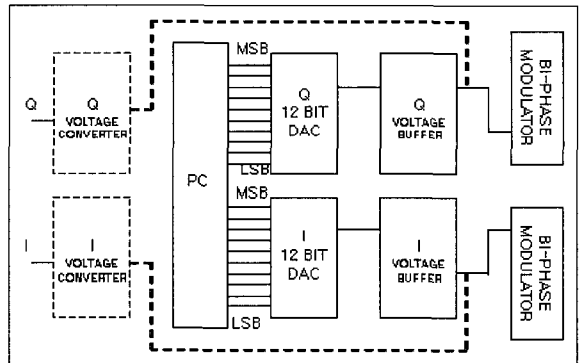
본 연구에서는 GPS CRPA용 배열안테나의 빔패턴을 전기적으로 조향(steering) 하기위한 기능을 구현하기 위한 방법으로 L밴드용 디지털 벡터모듈레이터를 적용하였다. GPS 및 재밍 신호는 그림 5에 표시된 GPS 배열안테나로 입사되어 GPS CRPA 시스템의 각 수신기(receiver)로 인가되며, 이후 재밍 신호의 도달각 계산 및 배열안테나 패턴제어 기능이 디지털 신호처리부에서 수행된다.

재밍 신호의 도달방향을 확인 후 재머 방향으로 안테나 널(null)을 합성하기 위한 방법으로 그림 6의 VM를 이용하며, 전기적으로 2×2 배열 안테나를 제어하여 원하는 안테나 패턴 합성을 가능하게 한다.

전기적으로 4채널의 벡터모듈레이터(VM)를 정밀 제어하기 위해서는 별도의 운용 장치가 필요하며, 이는 그림 7에 표시된 것과 같은 형태의 DAC(digital



[그림 6] GPS I/Q 벡터모듈레이터(VM)

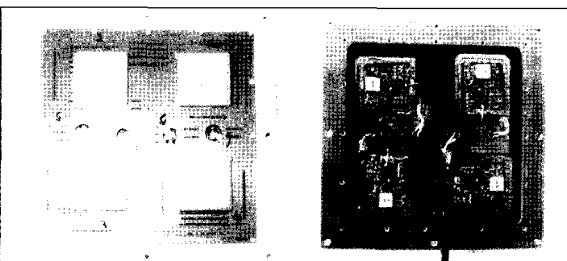


[그림 7] 벡터모듈레이터 제어용 DAC 구조

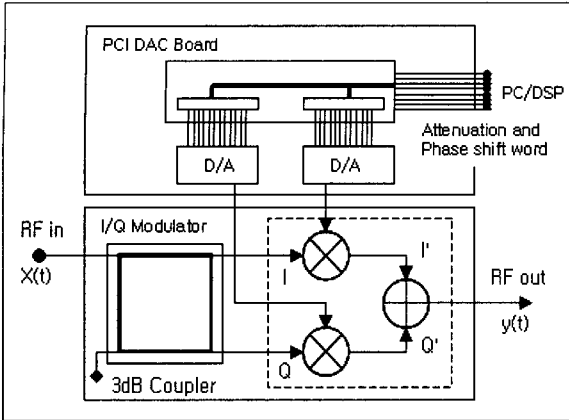
to analog converter)를 이용하여 구현할 수 있다. 이때 PC에서는 각 채널의 복소가중치를 I/Q 형태의 두 가지 전기신호로 변환하기 위한 12비트(bit)의 디지털 신호를 발생시켜 정밀한 위상 및 진폭 제어를 수행한다.

VM 및 제어기에 대한 전체 기능블록은 그림 8에 표시하였다. 먼저, RF신호는 그림의 왼쪽에서 오른쪽으로 전달되며, 제어신호는 PCI/DAC 보드의 12비트(bit) D/A 출력으로 이루어진다. 이러한 제어신호는 동위상(Inphase)성분과 직교위상(Quadrature) 채널 두 가지로 분리되어, RF 신호의 I/Q 벡터를 직접 mV 단위로 직접 제어하여, 각 채널에 대해서 0~360도범위의 위상제어가 가능하다.

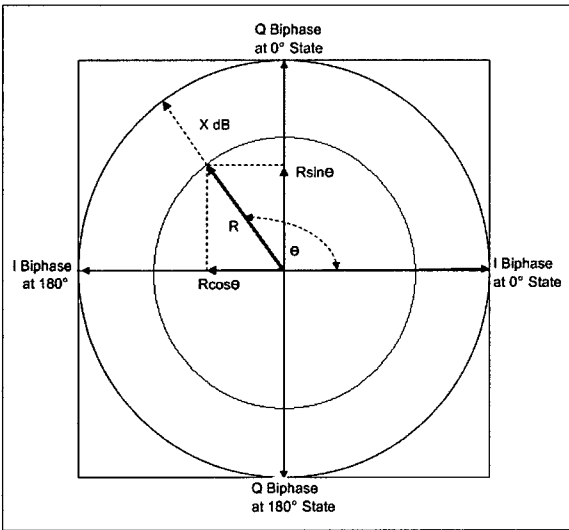
위상 및 진폭 신호감쇄기 기능을 수행하는 VM은



[그림 5] GPS L1 배열안테나(좌), LNA(우)



[그림 8] GPS용 디지털 벡터모듈레이터



[그림 9] VM제어용 I/Q 벡터관계도

독립적으로 I/Q로 분리된 RF신호의 크기조절(scale)을 수행하며, 이러한 출력신호는 합성(summed) 및 완충(buffered)과정을 거친다. 그리고 I/Q 벡터 신호의 상대적인 진폭(magnitude)을 조절함으로써, 지속적으로 신호의 진폭 및 위상을 제어함으로써, 안테나 패턴에 대한 특정방향의 이득(gain)조절이 가능하다. 이러한 원리는 그림 9에서와 같이 극좌표 표현을 이용하여 벡터이득(vector gain)을 계산할 수 있으며, I/Q 신호성분에 대한 감쇄(attenuation) 요소(factor)는 VM 모듈의 입력포트 V_{BBI} 및 V_{BBQ} 를 이용하여 x-축 및 y-축으로 표현 할 수 있다.

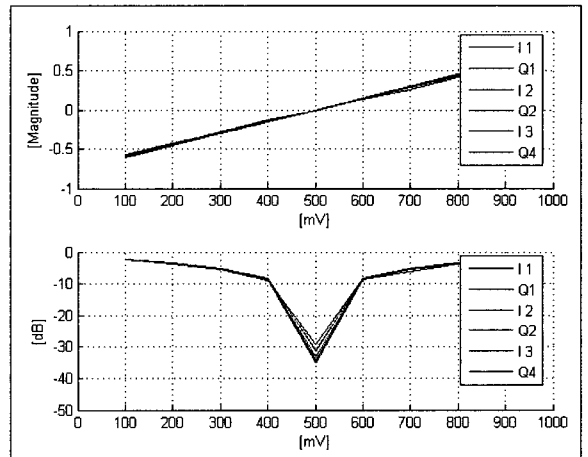
이렇게 정의된 값들은 벡터이득의 합(sum)을 의미하며, 크기(magnitude) 및 위상(phase)으로도 표현된다. 베이스밴드(BB) 입력 값의 조합을 선택하여, 단위원(unit circle)내에서 다양한 벡터이득을 적용할 수 있으며, 이는 이득 벡터의 +x축과 이루는 위상각의 크기를 위상변위(phase shift)라고 한다. 시스템에서 요구되는 이득, 위상 포인트와 직교좌표계에서의 관계는 식 (4)와 같이 표시 할 수 있다.

$$V = 10^{-X/20} \quad (4)$$

$$I = V \cos \theta, \quad Q = V \sin \theta$$

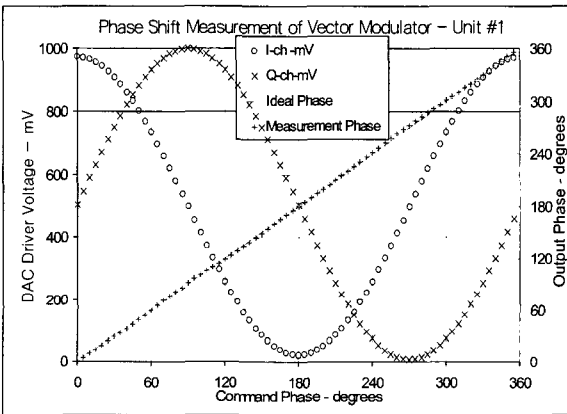
여기서 V 는 정규화된(normalized) 출력전압의 크기(magnitude), X 값은 원하는 벡터의 감쇄수준(attenuation level) 그리고 I/Q 는 감쇄제어입력(attenuator control inputs)을 의미한다. 이 세 가지 관계식을 이용하여, 합성벡터의 형태로 VM 제어용 신호로 적용이 가능하다.

최외각(outmost) 원(circle)은 단위원의 최대 이득의 크기(magnitude)를 의미하며, 원의 중심부(origin)는 이론적으로 이득이 0인 지점을 표시한다. 그렇지만, VM 회로의 정합불일치(mismatch)로 인한 원의 왜곡 현상 및 이득전달(feedthrough)으로 인하여 500mV 제어전압에서 각 채널 1~4의 이득 감쇄는 최대 -34.5dB 정도로 제한됨을 그림 10을 통해서 확인할 수 있다.



[그림 10] VM 이득조절 특성그래프(4채널)

GPS L1 CRPA 시스템의 안테나 패턴 제어에 이용된 VM #1의 실제 특성 그래프를 그림 11에 표시하였으며, 이는 I채널과 Q채널의 정확한 직교위상(quadrature phase)특성을 확인함과 동시에 제어 전압 0~1000mV에서 0~360도 구간에서 선형적인 위상제어 및 이상적인(ideal) 경우와 실제 측정된(measurement) 위상(phase)의 특성이 일치함을 직접 확인할 수 있다. 나머지 2~4번 VM에서도 동일한 특성을 얻을 수 있었다.



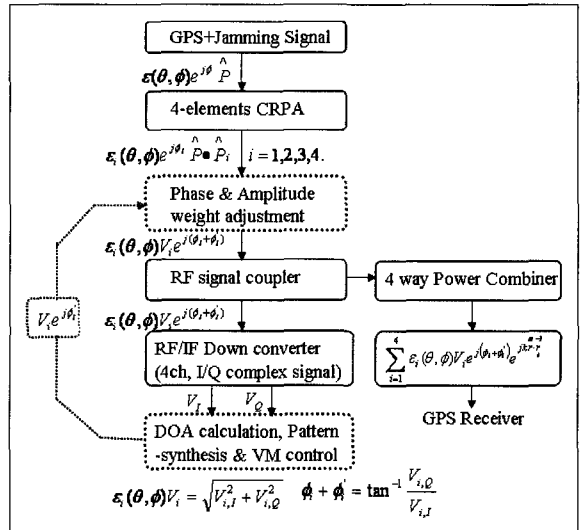
[그림 11] VM #1에서의 위상제어 특성

나. 안테나 패턴제어

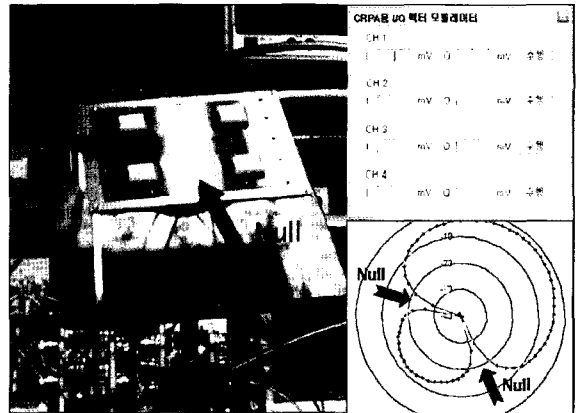
VM 제어는 PC에 내장된 DAC에서 발생하는 4채널 I/Q 제어신호에 의해서 수행되며, 이는 원하는 I/Q 제어명령을 PC에서 받은 후 DAC에서 I/Q 벡터모듈레이터(VM)로 아날로그 전압을 인가한다. 이러한 I/Q 전압 입력 값에 의해 구동되는 출력수준을 정확하게 제어하기 위해서는 각 채널의 위상변화에 따른 VM 제어전압을 계산할 수 있는 프로그램을 이용하여 실제 4채널의 VM에 대한 위상 및 진폭에 대한 전기적인 편이특성을 보상하여 동작하도록 구현되었다.

그림 12를 통하여 GPS L1 CRPA 시스템에서의 VM 제어신호의 흐름을 점선으로 표시하였으며, 4채널의 위상 샘플을 획득하며, 재밍 신호의 도달각(DOA)을 계산 후 VM 제어 블록으로 진폭 및 위상이 변화된 새로운 복소가중치를 인가하는 구조이다^[6].

4채널의 VM을 동작시키기 위해서는 각 안테나 채널에서 입력되는 신호의 진폭 및 위상을 제어해야하



[그림 12] GPS VM 제어신호 흐름도(점선)



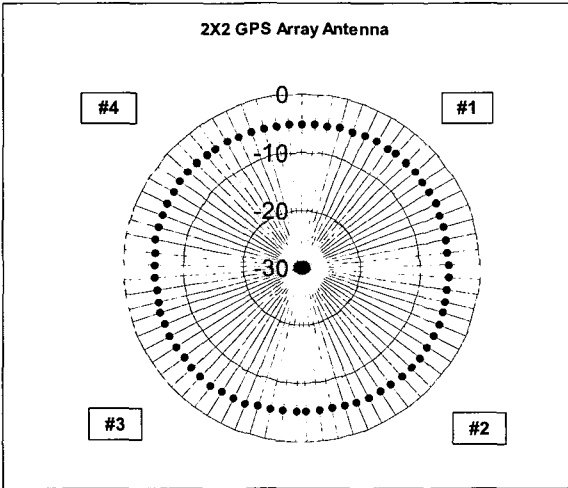
[그림 13] VM 제어용 프로그램 및 동작수행

며, 이는 PC/DSP 기반에서 동작하는 그림 13의 우측의 "CRPA용 I/Q 벡터모듈레이터" 제어용 프로그램을 이용하여 패턴을 합성한다. 그리고, 그림 13 좌측에 위치한 배열안테나를 향해서 두 개의 재밍 신호가 인가된다고 가정하면, 재밍신호의 방향을 탐지 한 후 안테나 제어기를 통해서 CRPA의 널(null) 패턴을 재합성하여 두 개의 "Null"을 생성하며, 이때 재밍신호 방향으로 배열안테나의 패턴을 약화시켜 GPS 재밍신호로 사용된 CW(Continuous Wave) 신호의 방향으로 안테나의 널(null)을 합성함으로써, 특정 방향에 대한 패턴 형성을 억제시키는 동작이 수행된다.

GPS L1용 CRPA 시스템의 패턴 시뮬레이션을 이용하여 분석한 정상상태의 패턴 결과를 그림 14에 표시하였으며, 전체적으로 일반적인 GPS 안테나와 유사한 등방성 패턴을 보임을 확인 할 수 있다.

표 1에서는 VM을 이용한 패턴제어 시뮬레이션에 필요한 I/Q 벡터모듈레이터 제어용 복소가중치(complex weight)를 위상 및 진폭으로 정리하였으며, 4채널의 VM을 제어하기 위한 I/Q 실제 전압 제어신호로 변환된 결과를 표시 하였다.

In[mV] 및 Quad[mV] 데이터를 VM 제어기 프로그램에 입력하면, 각 채널의 출력은 최대가 되며 일반적인 GPS 위성항법용 안테나 모드로 동작한다. 여기서 채널간의 위상차이로 생기는 경로 차이의 원인인 각 소자간의 상호결합, 전송선로 및 부품에 의한 위상지연 성분들을 보상해주어야 한다.



[그림 14] VM 패턴제어 결과(정상패턴)

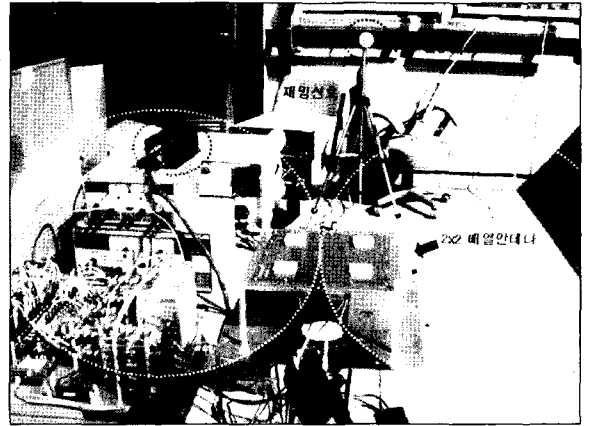
[표 1] 벡터모듈레이터 제어신호(정상패턴)

	Element#	Phase	Amp. [dB]	In [mV]	Quad [mV]
Complex Vectors	CH1	0	0	973	479
	CH2	0	0	973	503
	CH3	0	0	984	500
	CH4	0	0	843	505

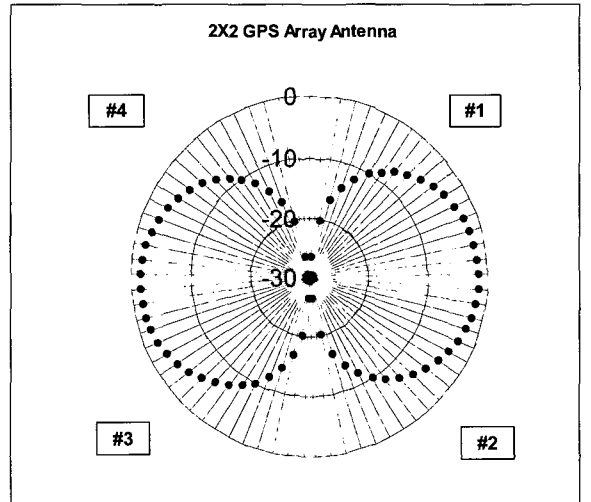
4. CRPA 패턴제어 결과

가. 안테나 패턴제어 실험

안테나 패턴 시뮬레이션 결과를 야외실험을 수행하여 얻은 실험 결과와 비교 분석을 위해서 그림 15에 실험에 필요한 CRPA 시스템 및 계측장비를 표시하였다. 재밍원은 1575MHz의 CW를 신호발생기를 이용한다. 재머의 방향은 화살표 방향으로 표시된 바와 같이 배열안테나 쪽으로 지향하며, 널(null) 패턴을 생성한 후, 재밍 신호의 경감수준을 스펙트럼 분석기를 이용하여 수신기 입력 포트를 측정한다.



[그림 15] CRPA 패턴제어 야외실험



[그림 16] VM 패턴제어 결과(널패턴)

CRPA 시스템의 패턴 시뮬레이션 결과를 그림 16에 표시하였으며, 상하로 안테나의 패턴의 변화가 생겼음을 확인할 수 있다.

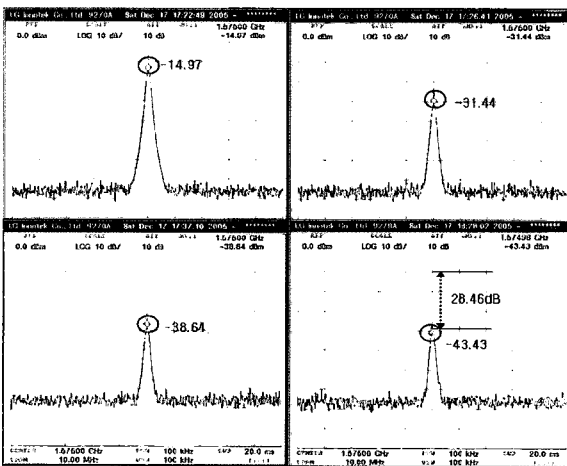
표 2에서는 널패턴 시뮬레이션에 필요한 VM 제어용 복소가중치를 정리한 것이다.

그림 17 좌측상단의 스펙트럼은 2×2배열안테나를 동위상으로 초기상태에서 측정된 재밍 신호의 크기를 표시한 것으로 -14.97dBm 정도로 인가됨을 알 수 있다.

두 번째 그림은 중간 단계의 안테나 패턴에 의한 측정치를 표시한 것이며, 재밍의 영향이 약해짐을 알 수 있다. 최종적으로 -43.43dBm 수준으로 약 28dB 차이를 확인하였다. 이는 최대 널(null) 위치가 재머

[그림 2] 널패턴 합성 후 재밍신호 감쇄측정

	Element#	Phase	Amp. [dB]	In [mV]	Quad [mV]
Complex Vectors	CH1	0	0	973	479
	CH2	0	0	973	503
	CH3	180	0	18	500
	CH4	180	0	20	505



[그림 17] 널패턴 합성 후 재밍신호 감쇄측정

방향으로 향하고 있으며, 그림 16의 분석 결과인 28dB와 유사함을 얻을 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 GPS L1에 대해서 2×2 배열 형태의 CRPA 시스템을 I/Q 벡터모듈레이터를 이용하여 구현하였으며, 널(null) 패턴을 합성하기 위하여 먼저 시뮬레이션 통해 분석할 결과를 표시하였으며, 야외 실험을 통한 측정결과와 비교를 위하여 CW 신호를 인가 후 널깊이를 확인하였다. 측정결과 28.46dB 정도의 재밍 신호 감쇄효과를 확인하였다. 이러한 결과는 GPS 수신기에 인가되는 재밍 전력을 CRPA 적용 후에 약 28dB 경감시킴으로써, 재밍 환경에서의 위성항법수신기의 운용성을 높일 수 있는 장점을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. R. Guerci, "Space-time Adaptive Processing for Radar", Artech House Inc. 2003.
- [2] Van Trees, "Optimum Array Processing part IV detection, estimation and modulation theory", WILEY, 2002.
- [3] Allen Ghavami, "Adaptive array systems fundamentals and applications", WILEY, 2005.
- [4] 김준오, "협대역 간섭신호에 의한 GPS 수신기 영향분석", 한국군사과학기술학회지 제7권 제2호, 2004, 6월.
- [5] 김준오, 배준성, 박홍원, "GPS 재밍시뮬레이터를 이용한 수신기 대재밍 성능분석", 11차 GNSS 워크샵, 2004, 11월.
- [6] 김준오, 배준성, 박홍원, "GPS 수신기용 재밍대응 위상배열안테나 빔패턴 합성에 관한 연구", 12차 GNSS 워크샵, 2005, 10월.