

디지털 벡터모듈레이터 기반의 2x2 GPS CRPA 패턴 제어기술

김준오*, 배준성*

*국방과학연구소 기술연구본부 1부 7팀(Tel:042-821-2196; Fax:042-821-2225; E-mail: jokim@add.re.kr)

요약문: 본 논문은 다양한 GPS 재밍대응 기술 중에서 안테나 기반의 CRPA(Controlled Reception Pattern Antenna) 시스템에 관한 소개 및 안테나의 널(null) 패턴 합성에 필요한 핵심 모듈인 디지털 I/Q 벡터모듈레이터(Vector Modulator)를 이용한 GPS용 2x2 CRPA 패턴 제어방법에 관한 연구 내용이다. 일반적으로 시스템에서 미리 결정된 방향으로 만들어진 안테나 빔을 이용한 위상배열안테나(phased array antenna)와는 달리 CRPA 구조의 GPS 위성수신용 적응배열안테나(adaptive array antenna)는 각 안테나 소자(element)로부터 수신된 신호들을 실시간으로 해석하여, GPS 배열 안테나의 패턴 특성을 제어한다. 본 연구에서는 2x2 배열 정사각(square) 구조의 CRPA를 채택했으며, 재밍신호 방향으로 널(null) 패턴을 합성하기 위한 방법으로 PC에서 제어 가능한 DAC(Digital to Analog Converter)을 이용하여 I/Q 벡터모듈레이터로 인가되는 RF신호의 위상(phase) 및 진폭(amplitude)을 조절한다. 이때 원하는 널(null) 패턴이 합성되도록 네 개의 각 안테나 소자 쪽으로 8채널의 복소가중치(complex weight)를 인가한다.

핵심어: GPS, 재밍, CRPA, 벡터모듈레이터, 널깊이

1. 서론

군사적 목적으로 GPS를 이용하기 위해서는 보다 정밀하고 안정적인 위치확인 시스템이 요구되며, 특히 적국의 인위적인 재밍 신호 의해서 야기되는 위성항법수신기의 수신능력약화 및 동작불능 상태는 심각한 문제이다. 이는 GPS신호가 지표면에서 약 -130dBm 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 받는다는 사실에 근거한다[1,4]. 현재, 이러한 GPS 수신기 운용에 영향을 주는 재밍 신호 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. 이 기술은 안테나의 빔형성(beam-forming) 및 널조향(null-steering) 기법을 이용한다[2,3]. 본 논문에서는 위성항법기술에서 많이 적용되는 널조향 기법 소개 및, 이를 구현하기 위해서 적용된 벡터모듈레이터 기술 및 빔 패턴 분석 내용을 제시한다. 논문의 구성은 서론에 이어, 2장에서 GPS 재밍 영향 및 CRPA 시스템, 3장에서 안테나 패턴제어 기술, 4장에서 이를 이용한 패턴제어 결과를 분석하며, 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

2. GPS 재밍범위 및 CRPA 시스템

2.1 GPS 재밍 범위분석

GPS 수신기 재밍에 필요한 전력은 식(1)을 이용하여 계산할 수 있으며 위성 신호와 재밍 전력의 관계를 이용하여 계산한다.

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

식(1)에서 J 는 재밍 전력, S 는 GPS 신호의 크기, J/S 는 재밍 마진(margin), G_{TX} 는 재머용 송신 안테나 이득(gain), G_{RX} 는 GPS 수신 안테나의 재머 방향으로의 이득, 마지막으로 PL (path loss)은 자유공간의 경로손실이다. 수신되는 위성신호의 세기는 일반적으로 L1신호의 경우 지표면에서 약 -130dBm 정도이며, 재밍마진 J/S 는 식(2)에 의해서 계산된다. 이는 BPSK(binary phase shift keying) 통신방식에서 요구되는 최소한의 SNR_{out} 과 수신기 내부 상관 손실(loss)에 해당하는 L_{sys} 를 이용하여 계산이 가능하다[5].

$$Jamming\ Margin = G_p - [L_{sys} + SNR_{out}] \quad (2)$$

예를 들면, 기저대역(baseband)의 처리이득(processing gain)을 43dB, BPSK시스템의 SNR_{out} 을 11dB, L_{sys} 를 2dB 수준 이라고 하면,

GPS 수신기의 J/S 는 약 30dB 정도가 된다. 이 값은 위성에서 수신되는 GPS 신호보다 30dB 높은 협대역 간섭 신호가 존재하면, 정상적으로 위성항법용 데이터 복조 기능을 수행할 수 없다는 것을 의미한다. 위의 내용을 기반으로 하여, GPS 수신기의 재밍 대응 능력에 따라서 분석된 재밍 범위는 [그림1]에서 그래프로 표시하였다.

그래프에 표시된 0.1W 실효등방성 복사전력 EIRP(Effective isotropic radiated power)의 지상에 배치된 GPS 재머(jammer)를 이용하여 위성항법수신기에 대한 재밍 시험을 수행한다고 가정한다. 이러한 조건에서 일반적인 상용 위성항법수신기에 대한 재밍 범위를 계산하면 약 10km 정도임을 분석 결과를 통하여 알 수 있다. 이는 약 30dB의 J/S 를 갖는 위성항법 수신기를 기준으로 계산한 결과로서, 이는 위성신호의 정상적인 추적(tracking)을 방해하여 위성항법이 불가능한 최대거리를 각 재머의 송신 출력에 대해서 표시한 것이다.

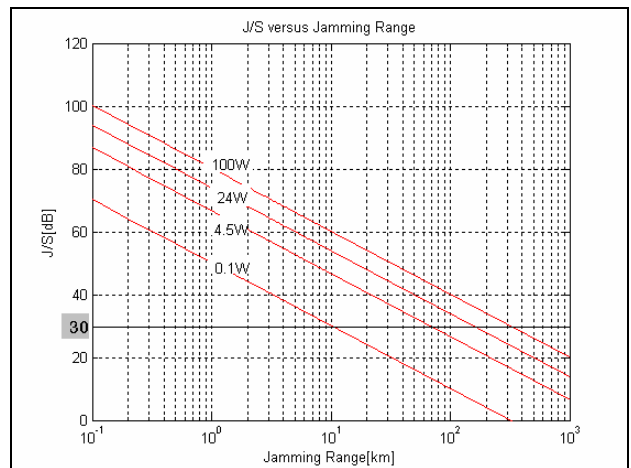


그림 1. GPS수신기 J/S에 따른 재밍범위
Fig. 1. GPS Receiver J/S versus Jamming Range

2.2 CRPA(Controlled Reception Pattern Antenna) 시스템

일반적인, 위상배열안테나(phased array antenna) 시스템에서는 미리 결정된 방향으로 안테나 빔을 만들어 이용하지만, CRPA 구조의 위성항법용 적응배열안테나는 각 안테나 소자로부터 수신된 신호들을 실시간으로 처리하여, 입사된 재밍 신호에 방향에 따라 안테나 패턴을 변화시킨다. 이는 원하지 않는 간섭 신호원인 SONI(Signal Of Not Interest) 방향으로 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 위상형법 수신기용 적응배열안테나 기술이다[3]. 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(phase) 성분을 이용하여 다양한 형태로 설계가 가능하다.

본 연구를 목적으로 제작된 GPS L1용 CRPA 시스템은 2×2 배열안테나 구조로 되어 있으며, [그림2]에 CRPA 운용시스템의 전체 구성을 표시하였다. 좌측으로부터 GPS L1용 4소자 배열안테나, 진폭 및 위상제어모듈, 전력분배기, 전력 합성기를 비롯하여 아래 부분에 4채널 수신기 및 VM 제어기로 구성된다.

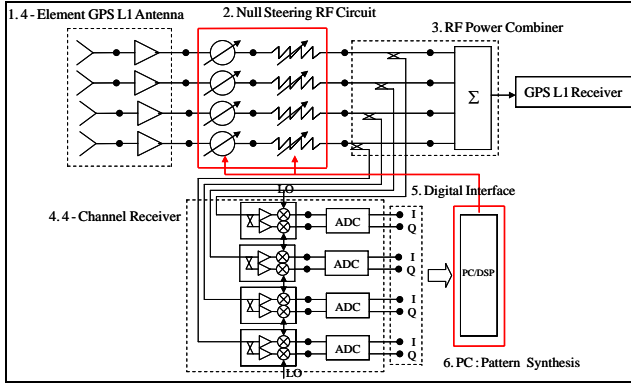


그림 2. GPS L1 CRPA 시스템 구조도
Fig. 2. GPS L1 CRPA System Structure

이러한 구조는 4채널의 위상 지연(delay) 샘플을 처리하여 재밍 신호의 도달각(DOA)을 계산한 후, CRPA 시스템에서 특정 방향으로의 안테나 널(null) 패턴 합성을 위한 과정이 필요하다. 이러한 기능을 수행하는 장치는 [그림2]에 “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 VM 모듈에 직접 복소가중치(complex weight)를 아날로그 전압 형태로 인가하여, CRPA의 패턴을 제어하는 형태로 구성된다. 이 단계에서 요구되는 운용환경에 따라 다양한 제어기법의 개발 및 이의 적용이 가능하다.

3. 안테나 패턴제어 기술

3.1 디지털 벡터모듈레이터

본 연구에서는 GPS L1 CRPA용 배열안테나의 빔패턴을 전기적으로 조향(steering)하기 위한 기능을 구현하기 위한 방법으로 L밴드용 디지털 벡터모듈레이터를 적용하였다. GPS 및 재밍 신호는 [그림3]에 표시된 GPS 배열안테나로 입사되어 GPS CRPA 시스템의 4채널 수신기(receiver)로 인가되며, 이후 재밍 신호의 도달각 계산 및 널 패턴(null pattern) 합성 기능을 수행한다.

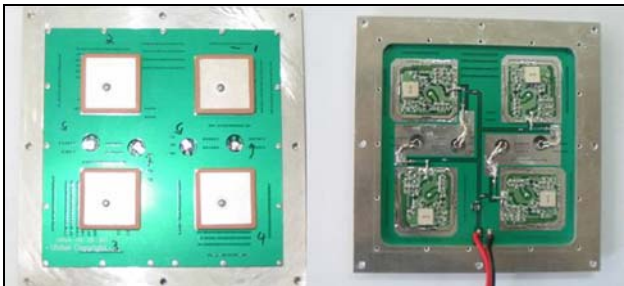


그림 3. GPS L1 CRPA (좌), LNA (우)
Fig. 3. GPS L1 CRPA (left), LNA (right)

CRPA 시스템에서 재밍 신호의 도달 방향을 확인 후 재머 방향으로 안테나 널(null)을 합성하기 위한 방법으로 [그림4]의 VM을 이용하며, 이는 전기적으로 2×2 배열안테나의 패턴을 제어하여 안테나의 수신 특성의 변화를 가능하게 한다.

4채널로 구성된 벡터모듈레이터(VM)를 정밀하게 제어하기 위해서는 별도의 디지털 제어장치가 필요하며, 이는 [그림4]에 표시된 것과 같은 형태의 DAC(digital to analog converter)를 이용하여 구현할 수 있다. PC/DSP라고 표시된 쪽에서는 각 채널의 복소가중치를 I/Q 형태의 두 가지 전기신호로 변환하기 위한 12비트(bit)의 디지털 신호를 발생시켜 정밀한 위상 및 진폭 제어명령을 전송한다. VM 및 제어기에 대한 신호 흐름은 [그림4]에 표시된 X(t)에서 오른쪽 Y(t)로 전달되며, 제어신호는 PCI/DAC 보드의 12비트(bit) D/A 출력으로 이루어진다. 이러한 제어신호는 동위상(Inphase)성분과 직교위상(Quadrature) 채널 두 가지로 분리되어, 입력되는 RF 신호의 I/Q 벡터를 직접 제어하여, 4개의 채널에 대해서 0~360도 범위의 위상제어가 가능하다.

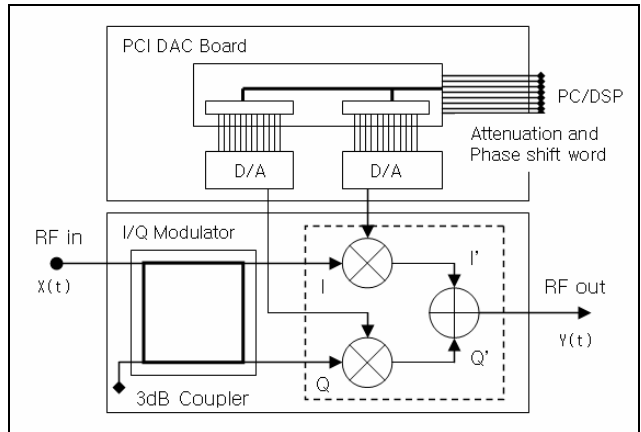


그림 4. GPS용 디지털 벡터모듈레이터
Fig. 4. Digital Vector Modulator for the GPS

위상 및 진폭 신호감쇄기 기능을 수행하는 VM은 독립적으로 I/Q로 분리된 RF신호의 크기조절(scale)을 수행하며, 이러한 출력신호는 합성(summed) 및 완충(buffered)과정을 거친다. I/Q 벡터 신호의 상대적인 진폭(magnitude)을 조절함으로써, 지속적으로 입력 신호의 진폭 및 위상 제어 및 안테나 패턴에 대한 특정 방향으로의 이득(gain) 조절을 가능하게 한다.

이러한 원리는 극좌표 표현을 이용하여 벡터이득(vector gain)을 쉽게 계산이 가능하며, 이는 I/Q 벡터 성분에 대한 감쇄(attenuation) 요소(factor)에 대해서 VM 모듈의 입력포트 V_{BB1} 및 V_{BBQ} 이용하여 x-축 및 y-축으로 표현 할 수 있다.

이렇게 정의된 값들은 벡터 이득의 합(sum)을 의미하며, 크기(magnitude) 및 위상(phase)으로도 표현된다. 베이스밴드(BB) 입력 값의 조합을 선택하여, 단위 원(unit circle)내에서 다양한 벡터이득을 적용 할 수 있으며, 이는 이득 벡터의 +x축과 이루는 위상각의 크기를 위상변위(phase shift)라고 한다. 시스템에서 요구되는 이득, 위상 포인트와 직교 좌표계에서의 관계는 식 (3)과 같이 표시 할 수 있다.

$$V = 10^{-x/20}, I = V \cos \theta, Q = V \sin \theta \quad (3)$$

여기서 V 는 정규화된 출력전압의 크기(magnitude), X 값은 원하는 벡터의 감쇄(attenuation) 수준(level) 그리고 I/Q 는 감쇄제어입력(attenuator control inputs)을 의미한다. 이 세 가지 관계식을 이용하여, 합성벡터의 형태로 VM 제어용 신호로 이용이 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 정합불일치로 인한 원의 왜곡현상 및 이득전달(feedthrough)로 인하여 500mV 제어전압에서 각 채널 12,3,4의 이득 감쇄는 최대 -34.5dB 로 제한된다[6].

GPS L1 CRPA 시스템의 안테나 패턴 제어에 이용된 VM #1의 실제 특성 그래프를 [그림5]에 표시하였으며, 이는 I채널과 Q채널의 정확한 직교위상(quadrature phase)특성을 확인함과 동시에 제어전압 0~1000mV 에서 0~360도 구간에서 선형적인(linear) 위상제어 특성 및 이상적인(ideal) 경우와 실제 측정된(measurement) 위상(phase)의 특성이 일치함을 직접 확인할 수 있다. 나머지 2,3,4번 VM에서도 동일한 특성을 얻을 수 있었다.

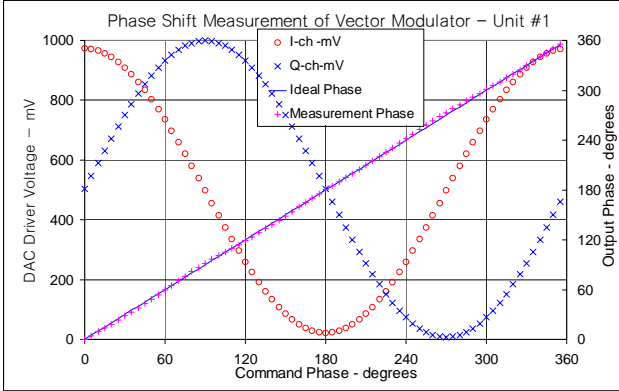


그림 5. VM #1에서의 위상제어 특성
Fig. 5. VM #1 Phase Control Characteristics

3.2 안테나 패턴제어

VM 제어는 PC에 내장된 DAC에서 발생하는 4채널 I/Q 제어 신호에 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.

[그림6]에서는 GPS L1 CRPA 시스템에서의 VM 제어신호의 흐름을 점선으로 표시하였으며, RF/IF블록을 통해서 4채널의 디지털 위상 샘플을 획득하며, 재밍 신호의 도달각(DOA)을 계산 후 VM 제어 블록으로 진폭 및 위상이 변화된 새로운 복소가중치를 인가하는 구조로 구성된다.

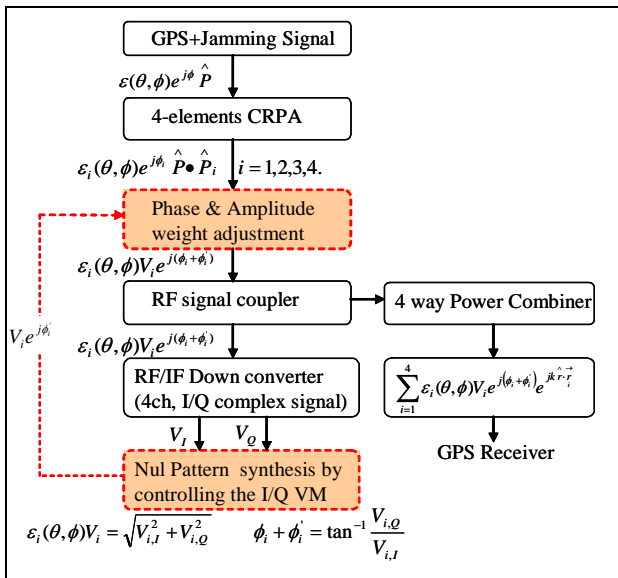


그림 6. GPS VM 제어신호 흐름도(점선)
Fig. 6. GPS VM Control Signal Flow(dotted line)

이러한 4채널의 VM을 동작시켜 원하는 안테나 패턴을 얻기 위해서는 각 안테나 채널에서 입력되는 신호의 진폭 및 위상을 정확히 제어해야 한다. 이는 PC/DSP 기반에서 동작하는 CRPA용 I/Q 벡터모듈레이터 제어용 소프트웨어를 이용하여 패턴합성 명령전달이 가능하다. 먼저 기본적인 안테나 패턴을 합성을 위한 복소(complex) 벡터 인가 명령수행이 필요하다. 이후 GPS L1용 CRPA 시스템의 패턴 시뮬레이션을 통하여 분석한 정상 모드(mode)의 GPS CRPA 패턴을 합성하기 위한 초기 상태의 4채널 제어 값을 [표1]에 표시하였다. 이는 VM을 이용한 패턴제어 시뮬레이션에 필요한 I/Q 벡터모듈레이터 제어용 복소가중치(complex weight)를 위상 및 진폭으로 정리한 것이며, 각 VM을 제어하기 위해 인가되는 I/Q 실제 전압 제어신호로 변환된 수치를 별도로 표시 하였다.

표 1. 벡터모듈레이터 제어신호 (정상모드)
Table 1. VM Pattern Control Signal (normal mode)

	Element	Phase	Amp.	I[mV]	Q[mV]
Complex - Vectors #1	CH1	0	0	973	479
	CH2	0	0	973	503
	CH3	0	0	984	500
	CH4	0	0	843	505

표시된 In[mV] 및 Quad[mV] 데이터를 VM 제어기 프로그램에 입력하면, 각 VM 채널의 출력은 최대가 되며 정상적인 GPS 위성항법용 수신기 안테나 모드로 동작한다.

4. CRPA 패턴제어 결과

4.1 안테나 패턴제어 실험

I/Q 벡터모듈레이터를 이용한 CRPA 패턴제어 방법은 앞에서 자세히 설명 하였으며, 4장에서는 안테나 패턴 시뮬레이션 결과를 야외실험을 수행하여 얻은 실험 결과와 비교 분석한다. [그림7]에는 야외실험에 필요한 CRPA 시스템, VM제어용 DAC 그리고 RF 계측장비를 표시하였다. GPS 재밍 신호원(source)으로는 1575MHz의 CW(Continuous Wave)를 L밴드 RF 신호발생기를 이용하여 송출하도록 구성되어 있다.

CW GPS 재밍 신호의 방향은 [그림7]의 장비 구성에서와 같이 2x2 배열안테나 쪽으로 지향하며, 이후 VM 제어기를 이용하여 최종적으로 안테나 널(null) 패턴을 생성한 후, GPS 재밍 신호의 감쇄 수준을 RF스펙트럼 분석기를 통해서 표시된 값을 측정하는 방식으로 실험을 수행 한다.

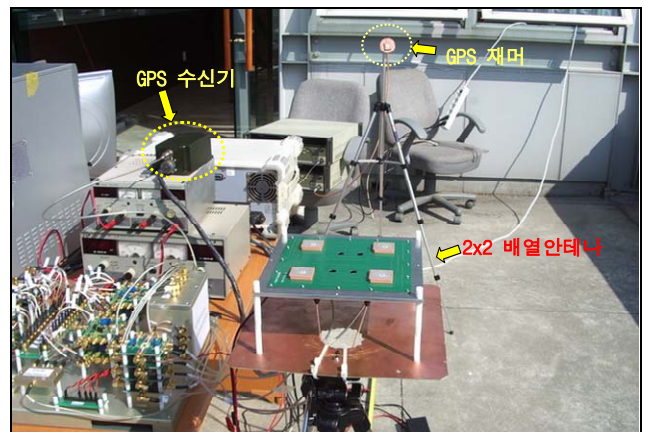


그림 7. CRPA 패턴제어실험 (야외)
Fig. 7. CRPA Pattern Control Test (Outdoor)

GPS L1 CRPA 시스템의 안테나 널(null) 패턴 시뮬레이션 분석을 위해서 개발된 프로그램을 이용하여 얻은 분석 결과

그래프를 [그림8]에 표시하였으며, 그림의 맨 좌측에서 번호 순서대로 단계적으로 안테나의 패턴의 변화가 생겼음을 확인할 수 있다. 여기서 4채널의 VM에 적용된 복소가중치는 [표2]의 값을 이용하였으며, 복소벡터#1은 [표1]에 표시된 정상모드의 위성항법수신용 안테나 패턴이며, 최종적으로 복소벡터 #4를 적용한 경우에는 본문의 위아래 방향으로 안테나의 널(null)이 합성 되었음을 확인할 수 있다.

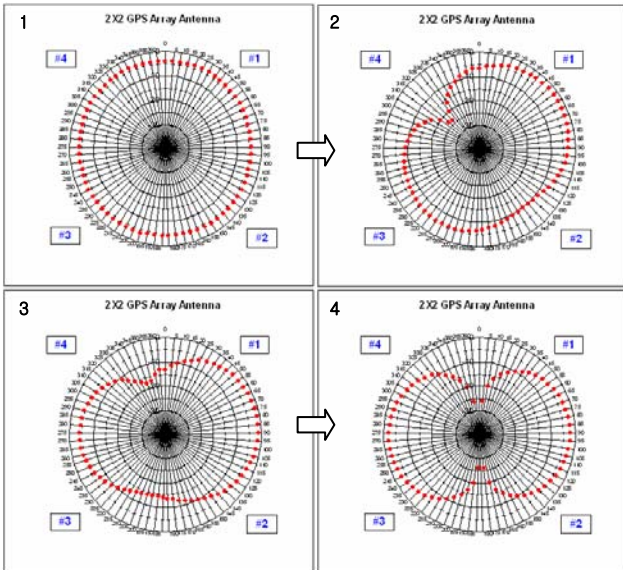


그림 8. VM 패턴제어 결과(널 패턴)
Fig. 8. VM Pattern Control Result (null mode)

표 2. 벡터모듈레이터 제어신호 (널 모드)
Table 2. VM Pattern Control Signal (null mode)

	VM#	Phase	Amp.	I[mV]	Q[mV]
Complex -Vectors #2	CH1	0	0	973	479
	CH2	0	0	973	503
	CH3	180	0	18	500
	CH4	50	0	812	882
Complex -Vectors #3	CH1	0	0	973	479
	CH2	0	0	973	503
	CH3	180	0	18	500
	CH4	130	0	192	882
Complex -Vectors #4	CH1	0	0	973	479
	CH2	0	0	973	503
	CH3	180	0	18	500
	CH4	180	0	20	505

[그림9]에서는 야외실험에서 수행한 실험 결과에 대해서 RF 주파수분석기(spectrum analyzer)를 이용하여 측정된 결과이다. 좌측상단의 스펙트럼은 2x2 배열 안테나를 동위상으로 조정된 안테나 정상모드에서 측정된 재밍 신호의 크기를 위성항법수신기 입력 단자 쪽에서 측정된 것으로 -14.97dBm 정도로 인가됨을 알 수 있다. 우측상단의 두 번째 그림은 두 번째 단계의 안테나 패턴에 의한 재밍 신호 경감 현상을 표시한 것이며, 점차 CW 재밍 신호의 영향이 약해짐을 알 수 있으며, 네 번째 그림에서 최종적으로 -43.43dBm 정도로 약 28dB 정도 재밍 신호의 경감 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이는 안테나 널(null) 패턴의 변화 단계에 따라 최대 널(null) 위치가 재밍 방향으로 향하고 있으며, [그림8]의 시뮬레이션 분석 결과와 널깊이(null depth) 수준이 유사함을 알 수 있다. 위의 결과에 의하면, I/Q 벡터모듈레이터(VM)를 이용한 CRPA 시스템의 널깊이(null-depth)를 [그림9]의 측정 결과를 통해서 약 28dB가 됨을 알 수 있으며, 이는 VM 제어용 시뮬레이션 분석 결과에서의 28dB 정도의 널깊이(null depth)의 수치와 1dB 이내 오차 수준의 결과를 얻을 수 있다.

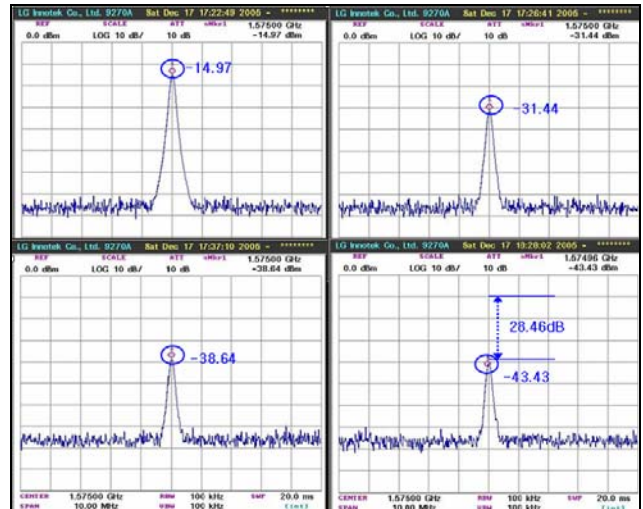


그림 9. 널 패턴 합성 후 재밍전력 감쇄현상 (4단계)
Fig. 9. Jamming Power Reduction After Null Synthesis (4-level)

5. 결론

본 논문에서는 GPS L1 신호에 대해서 디지털 I/Q 벡터모듈레이터를 이용한 4채널의 GPS RF신호를 직접 제어하는 방식을 채택한 시스템으로서, 2x2배열로 구성된 CRPA의 널(null) 패턴을 재밍 신호 방향으로 제어할 수 있음을 이론적 분석결과 및 야외실험을 통하여 확인하였다. 요약하면 아래와 같다.

CRPA 시스템의 널(null) 패턴을 재밍 신호 방향으로 합성한 후의 이론적인 분석 결과를 그래프로 표시하였다. 야외실험을 통한 실험 결과와의 비교를 위하여 CW 재밍 신호 인가 후 널 깊이(null-depth)를 측정된 결과 28.46dB의 재밍 신호 감쇄 효과를 확인하였다. 본 연구의 결과는 GPS CRPA 시스템을 이용함으로써 재밍 전력 수준을 경감시킬 수 있음을 확인하였으며, 이는 GPS 재밍 환경에서 위성항법수신기의 운용성을 높일 수 있는 장점을 얻을 수 있다.

참고 문헌

- [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 위성배열 안테나 빔패턴 합성에 관한 연구", 12차 GNSS 워크샵, 2005, 10월.