

계측 레이더 복소신호 분석에 의한 비행현상 계측

Target event analysis using complex signal of instrumentation radar

황 규 환* **서 일 환*** **예 성 혁***
Hwang Gyu Hwan Seo Il Hwan Ye Sung Hyuck

ABSTRACT

As weapon systems are becoming advanced and intelligent, they are designed to have such events like ejecting sub-munitions. So it is continually requested to measure the event time and position exactly. We can measure the event time and position by analyzing the complex signal of the instrumentation radar in the time domain and can also obtain the spin rate of the target by analyzing the complex signal in the frequency domain.

주요기술용어(주제어) : Event Time, Spin Rate(회전율), Complex Signal(복소신호), Instrumentation Radar(계측 레이더), Time Domain(시간 영역), Frequency Domain(주파수 영역)

1. 머리말

유도무기 비행시험 및 총포·탄약 성능시험을 수행할 때 계측 레이더로 표적을 추적하여 얻은 위치정보는 실시간으로 시험통제소에 보내져서 비행시험 상황을 통제할 수 있도록 해준다. 뿐만 아니라 시험이 끝난 후에는 저장된 계측자료를 분석하여 정밀한 비행 궤적을 얻을 수 있다. 그런데 많은 정밀 타격 무기체계들이 비행 중에 자탄을 방출하는 등, 특정한 현상을 일으키도록 설계됨에 따라 이벤트 발생시각을 계측하는 것이 중요한 계측항목으로 제기되어 왔다. 이벤트 발생시각을 측정하기 위해 지금까지 여러 가지 기법들이 제안되었으나 실제 운용에 많은 제약이 따랐다. 따라서 이벤트 발생시각을 더욱 정밀하게 계측

하기 위하여 레이더 수신자료의 진폭과 위상을 시간 영역에서 분석하는 기법을 개발하여 실제 시험에 활용하게 되었다. 그리고 레이더 복소신호를 주파수 영역에서 분석하면 표적의 회전율을 구할 수 있으므로 실제 MLRS 탄 계측자료에 적용하면 모탄의 회전율을 얻을 수 있다^[1,2].

본 논문에서는 계측 레이더인 RIR778(Range Instrumentation Radar)에 적용할 수 있는 이벤트 발생시각 검출기법과 표적의 회전율을 구하는 기법을 다루고 있다. 2절에서는 시험장에서 보유하고 있는 계측 레이더를 소개하고 이벤트 발생시각 검출의 필요성을 기술하였으며 이벤트 발생시각을 검출하기 위한 기존 방법들을 소개하였다. 3절에서는 새로 구현된 이벤트 발생시각 검출기법에 대해서 자세히 살펴보고 그 정확도를 분석하였다. 4절에서는 레이더 복소신호를 주파수 영역에서 분석하여 회전율을 계산하는 방법을 설명하고 시뮬레이션 자료와 실제 MLRS 계측자료에 대해 적용한 결과를 정리하였다. 끝으로

† 2006년 3월 30일 접수~2006년 6월 2일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
주저자 이메일 : whani@hanmail.net

5절에서는 레이더 복소신호 분석기법의 활용사례와 기대효과를 언급하였다.

2. 도입

가. 계측 레이더

무기체계의 비행성능시험을 성공적으로 수행하기 위해서는 표적에 대한 시·공간·위치 정보를 실시간으로 얻는 것이 필수불가결하다. 이를 위해 종합시험단은 계측 레이더를 사용하여 얻은 비행표적의 탄도 자료를 시험통제소로 전송하여 표적의 비행궤적을 대형 전시기에 나타내주며 시험통제소에서는 레이더 계측자료를 실시간으로 모니터링하면서 시험상황을 통제한다.

특히 무기체계가 정해진 궤도를 이탈하거나 이상 현상을 보이면 즉시 자폭명령 펄스를 송신하여 비행 종료명령을 내림으로써 안전하게 시험이 종료되도록 한다. 레이더에서 계측한 자료는 자기 테이프에 저장되어 시험종료 후에 자료처리를 통해 더욱 정밀한 비행궤적을 산출해낸다^[3].

나. 이벤트 발생시각 검출 필요성

다양한 무기체계들이 특수한 목적을 위해 목표물 지점에서 자탄을 방출하도록 설계되고 있다. 이러한 무기체계의 비행시험을 수행할 때에는 비행궤적 뿐만 아니라 자탄이 방출되는 시각을 계측하는 것이 매우 중요하다. 시험장에서 수락시험을 수행하고 있는 다련장 로켓(MLRS, Multiple Launch Rocket System)과 같은 무기체계가 자탄을 방출하는 대표적인 경우에 해당한다. 이러한 무기체계의 수락시험을 수행할 때에는 자탄방출시각을 계측해야만 신관이 규격에 맞게 작동하는지 판단할 수 있고 이벤트 발생시점에서 표적의 위치도 계산할 수 있다. 자탄방출시각과 모탄의 속도, 진입각도 등을 알면 자탄의 분산도를 추정할 수 있다.

MLRS탄 성능수락시험에서는 방출된 자탄이 미리 정해진 탄착범위 안에 들어와야 합격판정을 받는다. 해상사격장에서는 자탄의 탄착위치를 직접 구하기가 불가능하므로 그 대신 자탄방출시점에서 모탄의 속

도, 자탄방출위치 등을 이용하여 분산도를 추정한다. 자탄방출시점에서 모탄의 속도는 비행궤적을 평활한 후 시간에 대해 미분하면 얻을 수 있다. 시한신관을 장착한 각종 무기체계의 기술·수락시험에 대해서도 단순히 이벤트 발생 여부만을 알려주었던 기존의 방법에서 탈피하여 정확한 자탄방출위치를 계측하려면 정밀한 이벤트 발생시각 검출이 필요하다.

다. 기존의 이벤트 발생시각 검출방법

이벤트 발생시각을 검출하기 위해 기존에 사용하던 방법으로는 레이더 추적자료를 이용하는 방법, 적외선 센서를 이용하는 방법, 영상계측방법 등이 있다^[4-6].

1) 레이더 추적자료 이용

계측 레이더는 20ms마다 한 번씩 위치정보를 기록한다. 이벤트 발생시각은 레이더 자료저장주기인 20ms의 약 3배 정도의 오차범위에서 얻어진다. 비행궤적이 이벤트 발생시각을 기점으로 완만한 곡선을 그리며 변화하기 때문에 자료처리자의 주관적인 판단에 따라 자료처리 결과에 차이가 생긴다.

레이더 자료처리 결과로 얻어진 비행궤적을 시간에 대해 미분하여 속도성분을 분석하면 비행궤적의 변화를 더 뚜렷이 볼 수 있지만 정확한 이벤트 발생시각을 구하는 것은 역시 어렵고 단지 이벤트 발생 여부만 확인할 수 있다.

2) 적외선 센서 이용

적외선 센서는 발사장에서 표적이 발사될 때 생기는 화염을 감지하여 전기펄스를 만들어 줌으로써 발사시각을 제공하는데 사용되고 있다. 현재 NIDIR (Nike-Hercules Digital Instrumentation Radar) 시스템은 안테나 페데스털에 이와 동일한 사양의 적외선 센서를 부착하여 신관지연시간을 계측하고 있다.

레이더로 표적을 추적하면 적외선 센서가 표적을 향하게 되므로 표적이 폭발할 때 화염을 감지하여 이벤트 발생시각을 알려준다. 레이더 운용 컴퓨터는 GPS 수신기에서 제공하는 시각을 기준으로 전기펄스 입력시각을 기록한다.

적외선 센서를 사용하여 이벤트 발생시각을 계측하려면 신관이 작동할 때 화염이 방출되어야 하며 수신

된 적외선 신호의 세기가 센서를 작동시키기에 충분하도록 표적이 센서와 가까워야 한다. 이때 적외선 센서의 민감도를 시험환경에 맞추어 적절히 조절할 필요가 있다.

3) 영상계측

비행 중에 신관이 작동하여 자탄이 방출되는 무기 체계의 성능 시험에서도 이벤트 발생시점에서 계측된 영상자료는 매우 유용하다. 종합시험단은 FASIR (Flight Attitude System Slaved to Instrumentation Radar)라는 이동형 영상계측장비를 사용하여 비행중인 표적의 적외선 영상이나 비디오 영상을 계측하고 있다. FASIR에는 고속 디지털 카메라가 장착되어 있어 필요에 따라 고속영상을 디지털 자료로 저장할 수 있다. FASIR는 레이더 추적 시스템에 연동되어 작동하므로 종속적이지만, NIDIR 시스템은 레이더 추적과 동시에 안테나 페데스탈에 장착된 고성능 비디오 카메라와 적외선 카메라로 양질의 영상자료를 독립적으로 얻을 수 있다.

영상계측으로 얻은 자료에는 GPS 수신기에서 제공하는 시각이 자막으로 표시되어 영상이 기록된 시각을 알려준다. 비디오 영상은 기상조건의 영향을 많이 받고 원거리 계측에 불리하며 1초에 30프레임의 속도로 저장되므로 시간 분해능이 낮다. 이에 비해 적외선 영상은 기상조건의 영향을 덜 받고 비디오 영상보다 먼 거리에서도 양질의 영상자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 한편 고속카메라는 시간분해능이 높지만 계측할 수 있는 시간이 짧고, 계측한 영상을 다운로드하는 데 많은 시간이 소요된다.

3. 레이더 복소신호를 이용한 이벤트 검출

레이더 복소신호를 이용한 이벤트 발생시각 검출 기법은 50Hz로 기록되는 추적자료를 사용하지 않고 펄스반복주기(PRI, Pulse Repetition Interval)마다 기록되는 수신신호의 진폭과 위상의 변화를 관찰하여 신관작동시각 또는 자탄방출시각을 계측하는 방법이다. 펄스반복주기의 역수를 펄스반복주파수(PRF, Pulse Repetition Frequency)라고 하며 RIR778에서

는 160, 320, 640, 1280Hz의 PRF중에서 하나를 선택할 수 있다. 높은 PRF를 선택하면 평균 송신전력이 증가하므로 추적에 유리할 뿐 아니라 진폭과 위상이 저장되는 주기가 짧아져서 이벤트 발생시각을 검출할 때 시간 분해능이 좋아진다.

맹속도(blind speed)는 도플러 주파수가 PRF의 정수배가 될 때 표적이 고정 클러터로 간주되어 제거되는 속도로서 일반적으로 PRF가 높으면 표적의 속도가 맹속도에 해당될 경우가 상대적으로 적어진다. 그러나 추적 레이더는 표적으로부터 반사된 펄스들의 크기가 어느 빈도 이상으로 문턱치보다 커야 추적이 가능한데 PRF가 높으면 표적의 속도가 맹속도에 해당되는 순간에 많은 펄스들이 제거되므로 표적을 놓칠 확률이 오히려 높아질 수 있다.

가. 복소신호

시험장에서 보유하고 있는 계측 레이더 RIR은 코히런트 온 리시브(coherent-on-receive)방식으로서 복조된 신호는 진폭과 위상성분을 갖는다. 복조된 신호는 복소수로 표현이 가능한데 실수성분을 인페이즈(in-phase)성분, 허수성분을 쿼드러처(quadrature) 성분이라고 하며 줄여서 각각 I신호, Q신호라고 한다.

완전 코히런트 방식에서는 송신펄스들이 일정한 위상을 갖는데 반하여 코히런트 온 리시브 방식에서는 송신펄스들이 일정한 위상을 갖지 않는다. 다만 송신기에서 신호를 샘플링하여 수신기에 사용되는 발진기와 위상을 동기시켜 준다. 따라서 송신펄스와 수신펄스의 위상차는 완전 코히런트방식과 같게 되어 레이더 수신신호에는 표적의 레이더 반사면적에 관한 정보뿐 아니라 위상정보, 즉 도플러 효과에 의한 표적의 속도정보가 존재한다.

표적이 폭발하거나 분리되면 레이더 반사신호의 진폭이 크게 흔들린다. 그런데 진폭만 관찰해서는 이벤트 발생시각을 정확하게 알아내기가 쉽지 않으므로 진폭과 위상을 함께 분석하면 이벤트 발생시각을 쉽게 검출할 수 있다.

I와 Q값으로 위상을 계산할 때 진폭이 작은 경우에는 위상 값을 잡음으로 간주하고 계산에서 제외한다. 실제로 위상을 계산할 때에는 문턱치를 최대진폭의 1%로 놓고 진폭이 문턱치보다 작을 때에는 위상

을 계산하지 않고 이전 값을 그대로 사용했다. 이렇게 얻어진 위상은 $-\pi$ [radian]과 π [radian] 사이의 값을 갖는다. 그런데 위상에는 이미 랩핑(wrapping)현상이 일어난 상태이므로 위상에서 의미 있는 정보를 얻으려면 위상 언랩핑(phase unwrapping) 처리를 해야 한다.

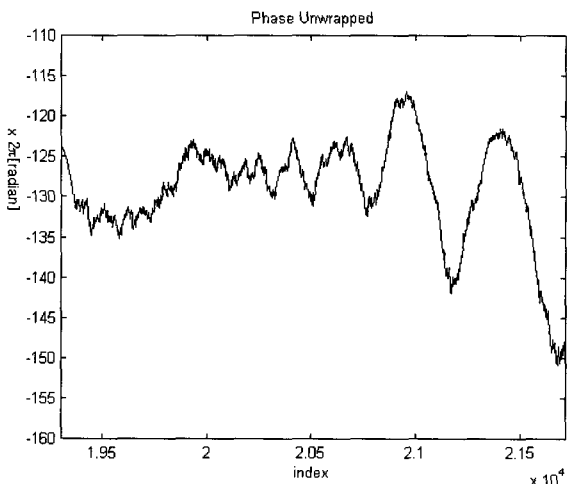
나. 위상 언랩핑(Phase Unwrapping)

수신된 복소신호의 위상은 표적의 거리에 따라 달라지다가 표적이 레이더 파장만큼 움직이면 위상이 랩핑된다. 예를 들어 위상이 0이던 것이 점점 증가하여 π [radian]을 지나는 순간 $-\pi$ [radian]로 갑자기 감소한 후 다시 증가한다.

위상 언랩핑의 기본개념은 위상의 변화를 주시하다가 위상이 이전 값보다 π [radian] 이상 갑자기 증가하거나 감소할 때에 랩핑이 발생한 것으로 보고 그 이후의 모든 값에 2π 를 더해 주거나 빼주는 것이다. 위상이 증가하는 추세였다면 랩핑 발생 이후의 값에 2π 를 더해주면 되고 위상이 감소하는 추세였다면 2

$$\Delta_j = \phi_{j+1} - \phi_j$$

$$\Psi_{j+1} = \begin{cases} \Psi_j + \Delta_j, & |\Delta_j| < \pi \\ \Psi_j + \Delta_j - 2\pi, & \Delta_j > \pi \\ \Psi_j + \Delta_j + 2\pi, & \Delta_j < -\pi \end{cases} \quad (1)$$

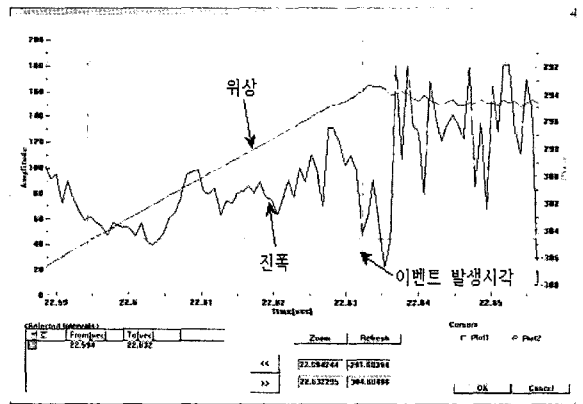


[그림 1] 위상 언랩핑을 한 상태

π 를 빼준다. 그림 1은 위상 언랩핑을 수행한 후에 위상의 변화를 그린 것이고 식 (1)은 선형경로 추적 기법(linear path following scheme)으로서 1차원 위상 언랩핑에 사용된다^[7].

다. 복소신호를 이용한 이벤트 발생시각 검출

그림 2는 레이더 복소신호 저장 파일에 대한 자료 처리를 수행할 때 시간에 따른 진폭과 위상의 변화를 함께 나타낸 것으로서 이벤트 발생시점에서 진폭과 위상의 변화가 두드러진 것을 알 수 있다. 위상과 진폭을 동시에 관찰할 수 있으므로 이벤트 발생시각을 판별하기가 쉽다. 위상이 갑자기 변하는 시점 근처에서 처음으로 진폭이 크게 변하는 시점을 찾아서 이벤트 발생시각으로 결정한다^[8].



[그림 2] 이벤트 발생시각 근처의 위상과 진폭

라. 이벤트 발생시각 검출기법의 정확도 분석

표 1은 MLRS탄 성능수락시험에 대하여 각기 다른 방법으로 측정한 자탄방출시각을 비교한 것이다. 비교대상은 RIR#1, RIR#2에서 수신신호의 위상과 진폭을 관찰하여 얻은 자탄방출시각과 광학장비인 FASIR의 비디오 영상, 그리고 NIDIR의 적외선 영상을 분석하여 얻은 자탄방출시각이다.

표 1에서와 같이 서로 다른 방법으로 측정한 자탄방출시각을 비교해 보면 전체적으로 NIDIR의 적외선 영상을 분석하여 얻은 자탄방출시각이 레이더 복소신호를 이용하여 얻은 결과에 비해서 늦는 편인데, 현재까지 측정한 결과에 의하면 약 11ms 정도 지연되는

[표 1] MLRS탄 성능수락시험 계측결과

시료	기준시각	비행시간			
		NIDIR	FASIR	RIR#1 (1280PRF)	RIR#2 (640PRF)
#1	14.30.47.93	22.705	22.706	22.690	22.686
#2	15.01.47.08	22.739	22.738	22.718	22.717
#3	15.04.44.88	22.713	22.731	22.708	22.707
#4	15.07.26.69	22.694	22.698	22.671	22.667
#5	15.10.16.08	22.770	22.777	22.759	22.761
#6	15.13.12.89	22.766	22.759	22.745	22.744

것으로 나타난다. 이는 영상자료가 30Hz로 저장되는 것에 비해 개발된 방법은 표적이 분리되거나 폭발할 때 표적으로부터 반사되어 나오는 펄스의 진폭과 위상의 변화를 감지하기 때문이다. MLRS탄 성능수락 시험의 경우에 RIR 복소신호를 분석한 결과를 기준으로 삼기 때문에 만일 RIR 계측자료를 사용할 수 없는 상황이 발생한다면 NIDIR 적외선 영상을 이용해서 얻은 자탄방출시각에서 약 11ms 정도를 빼준 시각과 NIDIR에서 계측한 탄도자료를 사용해서 자탄방출위치를 계산한다^[9].

RIR#1은 1280 PRF로 계측하였으므로 계측된 복소신호의 시간분해능이 높지만 RIR#2는 640 PRF로 계측하였기 때문에 시간분해능이 낮다. RIR#2의 계측 결과는 RIR#1의 계측결과와 거의 일치하며 그 차이는 ±1ms 이내에 불과하다. 이벤트 발생시점을 읽을 때 실제로 이벤트가 발생한 시점 앞뒤로 세 개까지의 자료를 잘못 선택할 수 있다고 보고 오차범위를 ±3/PRF초로 간주하였다. 실제로 자료처리를 해보면 판독오차는 대부분 ±2/PRF초 안에 들어온다^[10].

4. 주파수 영역에서 레이더 복소신호 분석

가. 복소신호 모델

레이더 수신신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $A(t)$ 는 레이더 반사신호의 진폭, ω_c 는 송신

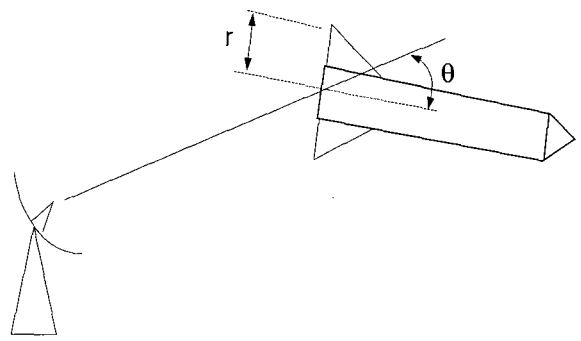
주파수, $\phi(t)$ 는 반사신호의 위상이다. RIR은 코히런트 레이더이므로 위상정보인 $\phi(t)$ 를 얻을 수 있으며 펄스반복주기마다 기록되는 복소신호는 $A(t)e^{j\phi(t)}$ 의 형태를 갖는다^[11,12].

$$r(t) = A(t) \cos(\omega_c t + \phi(t)) \tag{2}$$

위상 $\phi(t)$ 는 표적이 정지한 상태라면 일정한 값을 갖지만 표적이 움직이면 그에 따라 위상이 바뀐다. 표적이 레이더와 이루는 종축각(aspect angle)이 θ [radian], 표적의 회전반경이 r [m], 회전율이 f_s [Hz], 날개의 개수가 N 개라고 하고 날개의 끝 부분에서 전파 산란이 발생한다고 가정하면 k 번째 날개에 의한 산란체의 거리변화는 식 (3)과 같으며 그에 따른 위상변화는 식 (4)와 같다. 식 (4)를 미분하면 k 번째 산란체에 의한 도플러 편이가 식 (5)와 같이 계산된다. 여기서 도플러 편이의 최대값을 식 (6)과 같이 f_m 이라고 정의하면 위상을 식 (7)과 같이 간단히 표현할 수 있다. 따라서 N 개의 산란체의 거리변화와 표적 전체의 거리변화에 따른 위상변화는 식 (8)로 표현된다. 여기서 표적 전체의 속도와 가속도는 거리방향으로 각각 v [m/s], a [m/s²]이다.

$$\Delta R_k(t) = r \sin\theta \cos(2\pi f_s t + 2\pi k/N + \psi) \tag{3}$$

$$\phi_k(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_k \tag{4}$$



Radar

[그림 3] 표적 모델

$$f_d(t) = -\frac{1}{2\pi} \dot{\phi}_k(t) \quad (5)$$

$$= \frac{4\pi r f_s}{\lambda} \sin \theta \sin(2\pi f_s t + 2\pi k/N + \psi)$$

$$f_m = \frac{4\pi r f_s}{\lambda} \sin \theta \quad (6)$$

$$\phi_k(t) = \frac{f_m}{f_s} \cos(2\pi f_s t + 2\pi k/N + \psi) \quad (7)$$

$$\phi(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \phi_k(t) + \frac{4\pi}{\lambda} (vt + \frac{1}{2}at^2) \quad (8)$$

$$= \frac{f_m}{f_s} \sum_{k=0}^{N-1} \cos(2\pi f_s t + 2\pi k/N + \psi) + \frac{4\pi}{\lambda} (vt + \frac{1}{2}at^2)$$

표적의 속도와 가속도에 의한 위상이 보상되어 회전성분만 남은 신호는 주기함수이므로 푸리에 급수로 표현이 가능하다. 푸리에 급수의 계수는 식 (9)와 같이 계산되며 $n = 0, \pm N, \pm 2N, \dots$ 과 같이 n 이 N 의 정수배인 경우에 대해서만 0이 아닌 값을 갖는다. 여기서 J_n 은 제1종 n 차 베셀함수이다^[13].

$$X(nf_s) = \int_0^{1/f_s} \left\{ \frac{\exp\left\{j(f_m/f_s) \sum_{k=0}^{N-1} \cos(2\pi f_s t + 2\pi k/N + \psi)\right\}}{\exp(-j2\pi n f_s t)} dt \right\} \quad (9)$$

$$= (J^n/f_s) J_n(f_m/f_s) \sum_{k=0}^{N-1} \exp(j2\pi n k/N)$$

$$= N(J^n/f_s) J_n(f_m/f_s)$$

따라서 위상이 보상된 복소신호에 다시 구간을 이동하면서 FFT를 취하면 주파수 영역에서 회전율의 N 배에 해당하는 위치에 베셀 라인(Bessel line)이 나타나므로 베셀 라인의 위치를 읽어서 N 으로 나누어 주면 회전율을 얻을 수 있다. 베셀함수의 인수인 $\beta = f_m/f_s$ 는 베셀 라인의 수를 결정한다. β 값이 커지면 베셀 라인도 많이 나타나는데 베셀 라인이 대략 β/N 의 정수부만큼 나타나므로 식 (10)으로 베셀 라인의 수를 표현할 수 있다.

$$N_{Bessel\ line} = \text{Int} \left(\frac{f_m}{Nf_s} \right) \quad (10)$$

계측 레이더는 연속파를 PRF로 샘플링한다고 볼 수 있으므로 주파수 영역의 한계는 $-PRF/2$ 에서 $PRF/2$ 까지이다. β 값이 너무 크면 주파수 영역의 한계를 넘어서 랩 어라운드(wrap around)되므로 실제 베셀 라인의 위치를 알기 어렵다. 반면에 β 값이 너무 작으면 베셀 라인이 생기지 않는다. 따라서 종축각을 조절하여 적당한 β 값을 결정해야 한다. 식 (11)은 원하는 베셀 라인 수에 대해 종축각을 결정하는데 사용한다.

$$\theta_{min} = \sin^{-1}(N_{Bessel\ line} \lambda N / (4\pi r)) \quad (11)$$

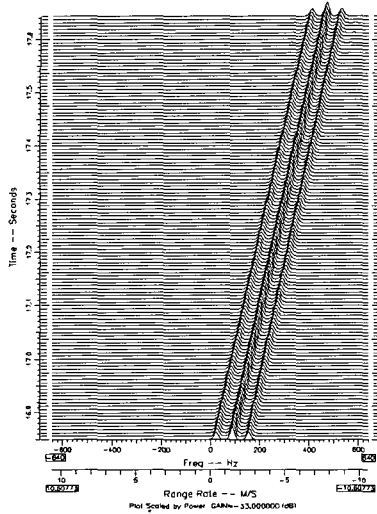
나. 시뮬레이션

표적의 회전 반경을 0.227m, 종축각을 0.02radian, 거리방향 속도와 가속도를 각각 300m/s, -50m/s²라고 하고 회전율을 식 (12)처럼 3차 다항식으로 모사하여 복소신호를 생성하였다. 여기서 $a_3 = -0.00128965$, $a_2 = 0.00644762$, $a_1 = 0.06958306$, $a_0 = 49.7878225$ 이다.

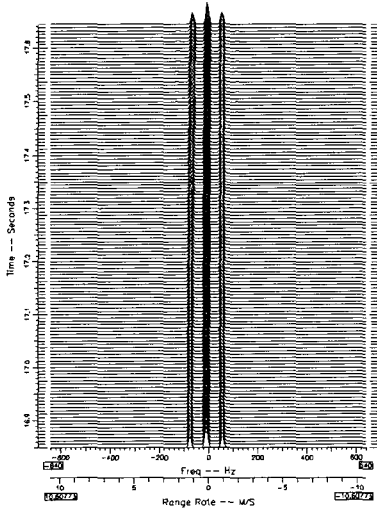
$$f_s(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (12)$$

그림 4에서는 표적 전체의 가속도 성분 때문에 도플러 편이가 일정한 비율로 커지는 것을 볼 수 있다. 표적 전체의 움직임을 보상해주면 그림 5와 같이 주파수 성분이 직류를 기준으로 정렬된다. 여기서는 베셀 라인이 직류 성분을 중심으로 좌우에 하나씩 나타난다. 회전반경을 크게 하거나 종축각을 크게 하면 베셀 라인이 더 많이 생기는 것을 확인할 수 있다. 위상보상 후에도 베셀 라인이 뚜렷이 나오지 않고 도플러 편이가 주기성을 띄면 FFT를 취한 구간이 너무 짧은 것이므로 구간을 더 늘여 주면 된다^[14,15].

회전율이 일정하다면 베셀 라인이 위치한 곳의 주파수를 읽어서 날개의 개수로 나누어 주면 회전율을 얻게 된다. 그러나 회전율이 시간에 따라 변하면 베셀 라인의 위치가 바로 회전율에 해당하는 것은 아니다. 회전율이 $f_s(t) = at + b$ 라고 가정한다면 위상은 $\cos(2\pi(at+b)t + \psi)$ 와 같은 형태가 된다. 코사인 함수의 인수를 시간에 대해 미분하면 주파수 성분이 $2at + b$ 로 나온다. 이것은 $\exp\{j(\cos(2\pi(at+b)t + \psi))\}$



[그림 4] 위상보상 전



[그림 5] 위상보상 후

에 구간 FFT를 취해서 얻은 실제 베셀 라인의 위치와도 일치한다.

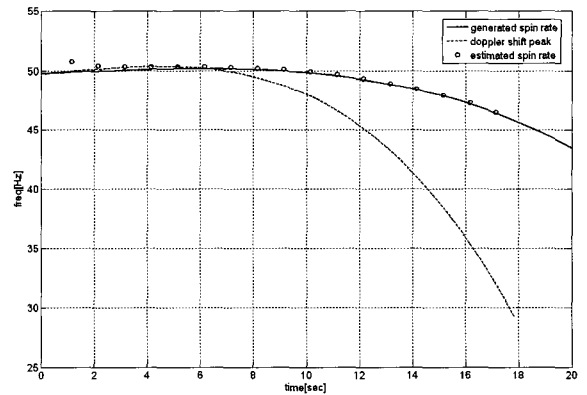
따라서 회전을 시간에 관한 함수라면 베셀 라인의 위치를 얻은 후에 시간축에서 적분을 해야 한다. 베셀 라인의 위치, $2at+b$ 를 적분하면 $f_s(t)t = at^2 + bt + c$ 가 된다. 이때 기준이 되는 한 시점 t_0 에서 회전을 $f_s(t_0)$ 를 미리 알고 있다면 상수 c 를 결정할 수 있다. 적분 결과를 t 로 나누어 주면 실제 회전을

$f_s(t)$ 를 얻게 된다. 정리하면, 베셀 라인의 위치 f_d 를 알고 있을 때 식(13)과 같이 적분한 후에 그 결과를 t 로 나누어 주면 회전을 얻을 수 있다.

문제는 기준이 되는 시점 t_0 에서 회전을 $f_s(t_0)$ 를 알아내는 것인데 이는 베셀 라인이 일정하게 형성되는 시점에서는 베셀 라인의 위치가 바로 회전에 해당한다는 것을 이용하면 된다.

$$f_s(t)t = \int_0^t f_d(\tau) d\tau + f_s(t_0)t_0 - \int_0^{t_0} f_d(\tau) d\tau \quad (13)$$

그림 6은 모사된 복소신호를 분석하여 시간에 따른 베셀 라인의 위치인 도플러 편이 첨두치(Doppler shift peak), f_d 를 구한 다음 식 (13)을 사용하여 회전을 계산한 결과를 보여준다. 이때 베셀 라인의 거의 상수로 나타나는 5초를 기준시각 t_0 로 사용하였다.

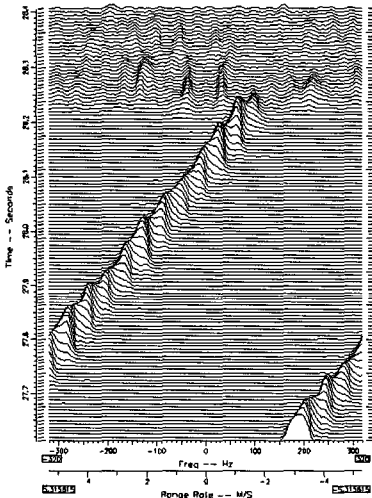


[그림 6] 도플러 편이로부터 회전을 계산

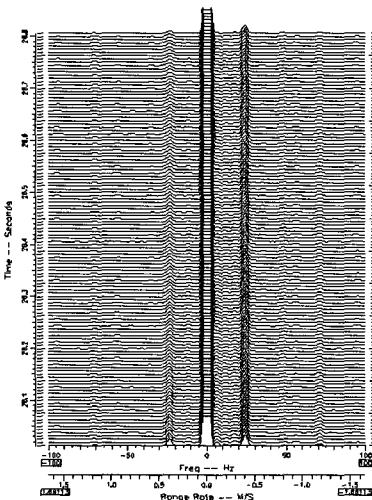
다. 실제 MLRS탄의 복소신호 분석

시뮬레이션과는 달리 실제 로켓탄을 추적하여 얻은 복소신호는 전체 추적구간에서 회전을 구하기에는 적합하지 않고 자료의 상태가 양호한 일부 구간만 분석이 가능하다. 그림 7부터 그림 9까지는 시뮬레이션 자료를 분석할 때와 동일한 방법으로 MLRS탄에 대해 회전을 구한 것이며 자료처리가 가능한 구간에서 회전은 거의 일정하므로 베셀 라인의 위치를 낱개의 수로 나누어서 회전을 구하였다.

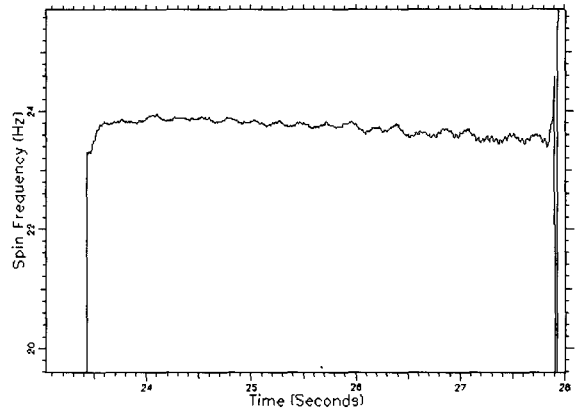
그림 7에서는 자탄이 방출될 때 주파수 영역에서 큰 변화가 있음을 알 수 있으나 복소신호의 진폭과 위상을 함께 관찰할 때처럼 정밀하게 자탄방출시점을 알 수는 없다. FFT 구간을 늘이면 주파수 분해능은 높아지지만 시간 분해능이 낮아지고 반대로 FFT 구간을 줄이면 시간 분해능은 높아지지만 주파수 분해능이 낮아지므로 주파수 영역에서 도플러 편이 형태를 관찰하여 이벤트 발생시각을 계측하는 데에는 한계가 있다.



[그림 7] MLRS탄 위상보상 전



[그림 8] MLRS탄 위상보상 후



[그림 9] MLRS탄 회전율×4

표적의 속도와 가속도에 의한 위상을 보상하면 그림 8과 같이 시간에 따른 도플러 성분이 직류 주위로 정렬이 되고 표적의 회전율에 날개의 수를 곱해준 값에 해당하는 위치에 베셀 라인이 생성된다. 그림 9는 시간에 따른 베셀 라인의 위치를 찾아낸 것으로 베셀 라인의 위치를 날개의 개수로 나누면 회전율을 얻을 수 있다.

5. 맺음말

현대의 첨단 무기체계들이 비행 도중에 자탄을 방출하는 등 특정 이벤트를 갖도록 설계되고 있는 추세에 따라 이벤트 발생시각 및 표적의 회전을 계측과 같은 비행현상 계측이 계속 요구되고 있는 실정이다.

기존에는 레이더 추적자료를 분석하여 신관작동 여부만 알려주면 되었으나 점차 정확한 자탄방출위치를 이용하여 자탄의 분산도를 추정하는 것이 필요하게 되었다. 자탄방출위치 계산을 위해서는 정확한 이벤트 발생시각이 필요하므로 레이더 수신신호의 위상과 진폭을 분석하여 이벤트 발생시각을 정밀하게 계측하는 기법을 개발하였다. 개발된 방법은 고속으로 저장된 복소신호를 이용하므로 시간 분해능이 높고 영상 분석적으로는 많은 제약이 따랐던 원거리 계측에도 문제없이 그 성능을 발휘할 수 있다.

한편, 시뮬레이션 자료와 실제 MLRS 계측자료를 주파수 영역에서 분석하여 표적의 회전율을 계산함으

로써 주파수 분석기법의 타당성을 입증하였다. 주파수 영역에서도 도플러 편이 패턴을 살펴보면 이벤트 발생시점을 어느 정도는 추정할 수 있으나 복소신호의 진폭과 위상을 함께 관찰하는 것에 비해 정밀하지 않다.

본 논문에서 소개한 계측 레이더 복소신호 분석기법을 실제로 MLRS 비행시험에 적용하여 성공적으로 자탄방출위치를 계측하여 시험주관부서에 제공하고 있다. MLRS 비행시험 이외에도 비행 중에 특정 이벤트를 발생하는 다양한 무기체계에 개발된 기법을 활용하면 유용한 레이더 계측자료를 획득할 수 있을 것으로 판단되며 도입 예정인 광대역 레이더 센서에도 복소신호 분석기법을 적용하면 더욱 향상된 성능을 발휘할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 황규환, 표적운동분석 이론, DSTC-509-030815, 국방과학연구소.
- [2] 예성혁외 1명, TMR 성능개량 현지점검 및 운용 교육, DSTC-609-03062, 국방과학연구소.
- [3] RIR-778X Technical Manual, Theory and Maintenance, BAE Systems.
- [4] 황규환외 3명, 계측 레이더와 영상자료를 이용한 HOB 계측기법 개발, DSTC-409-011012, 국방과학연구소.
- [5] 서일환외 3명, NIDIR 시스템을 이용한 HOB 측정, DSTC-509-010347, 국방과학연구소.
- [6] 서일환외 3명, 계측 레이더를 이용한 비행체의 폭발고도 측정, DSTC-509-961227, 국방과학연구소.
- [7] J. M. Huntley, Noise-immune Phase Unwrapping Algorithm, Applied Optics, 28, pp.3268~3270, 1989.
- [8] 황규환외 2명, 계측 레이더를 이용한 이벤트 발생시각 검출기법, DSTC-509-050432.
- [9] 서일환외 4명, MLRS탄 탄두파열시각 계측결과 분석, DSTC-509-060315, 국방과학연구소.
- [10] Semyon G. Rabinovich, Measurement Errors and Uncertainties 2nd Ed. AIP Press.
- [11] August Rihaczek, Steven Hershkowitz, Radar Resolution Complex-Image Analysis, Artech House, 1996.
- [12] Byron edde, Radar Principles, Technology, Applications, Prentice Hall, 1993.
- [13] Ziemer, Principles of Communications, Houghton Mifflin, 1990.
- [14] Alan V. Oppenheim, Discret time signal processing, Prentice Hall, 1989.
- [15] John G. Proakis, Digital Signal Processing using MATLAB, Brooks/Cole, 2000.