

4채널 지연선로를 이용한 디지털 주파수 판별기 구현에 관한 연구

국찬호* · 권익진*

*아주대학교 일반대학원 전자공학과 석사과정

**아주대학교 일반대학원 전자공학과 교수

Study on Implementation of a Digital Frequency Discriminator using 4 channel Delay line

Chan-Ho Kook* · Ik-Jin Kwon**

**Ajou University

E-mail : *chkook007@ajou.ac.kr, **ijkwon@ajou.ac.kr

요 약

공간상에 존재하는 전자파를 측정, 분석하여 신호정보(SIGINT; SIGnal INTelligence)를 획득하기 위해서 가장 중요한 것이 전자파의 주파수 정보이다. 특히 레이더 및 미사일에서 방사되는 초고주파 대역의 주파수를 순시 측정하는 방법으로, 지연선로의 위상차를 측정하여 주파수정보를 디지털 데이터를 출력하는 부품으로 디지털 주파수 판별기(Digital frequency Discriminator; DFD)가 있다. DFD는 100nSec 이하의 짧은 시간동안에 존재하는 고주파 신호에 대해서도 초고주파신호의 주파수 정보를 실시간으로 측정하여 제공해야 한다.

본 논문에서는 광대역 4 채널의 지연선로와 코릴레이터로 구성된 고주파 입력부와 I/Q신호를 처리하여 주파수 정보를 얻어내는 디지털 처리부 및 정확한 주파수 정보를 얻기 위한 주파수 보정부로 이루어진 DFD의 구현방안을 제안하고 아주 짧은 펄스 형태의 모의 레이더 신호를 입력하여 얻은 시험결과를 토대로 설계의 타당성을 확인한다.

ABSTRACT

SIGINT(SIGnal INTelligence) includes several parameters intercepted by measurement and analysis of the RF(Radio frequency) signal from free space. One of the important parameters is frequency information. Expecially, in order to perform instantaneous frequency measurement of Radar and Missile seeker's RF signals, we use dedicated RF modules as a DFD(Digital Frequency Discriminator) to provide frequency information by measurement of the relative phase difference between signals via intended RF delay lines. It must measure and provide realtime based frequency information on short pulsed RF signal up to 100 nSec or less.

This document proposes Ultra wideband DFD consisted of a RF input section of Wideband 4 channel RF delay line and correlator, a digital processing section to measure and provide frequency information from I/Q signal, and a frequency calibration section. Also, it will show design suitability based on test results measured under test condition of very short input pulse signals.

키워드

DFD, Correlator, Frequency measurement, Short Pulse

1. 서 론

초고주파 대역을 사용하는 레이더 및 미사일 Seeker로부터 송출되는 전자파 신호의 제원분석

및 정보파악을 수행하는 신호정보(SIGINT) 분야에서 신호측정을 위해 가장 중요한 파라미터 중 하나가 주파수 정보이다.

본 논문에서는 주요 전자전장비 구성요소인 전

차지원(ES : Electronic Support) 장비와 순시 주파수 측정 수신기(IFM(Instantaneous Frequency Measurement) Receiver)에서 실시간으로 위상차를 측정하여 주파수를 찾아내고 디지털 값으로 그 결과를 출력하는 다채널 지연선 구조의 DFD에 대해 고찰하였다.

또한, 10GHz 이상의 넓은 주파수 영역에서 동작하고, 주파수 측정 정확도가 우수한 초광대역 DFD 설계에 필요한 지연선(Delay)과 상관기(Correlator)간 위상특성 연구, 위상 정밀측정을 위한 A/D변환회로 및 실시간 제어 디지털 회로 연구, 정밀보상회로 및 보정방법에 대한 연구 내용을 다룬다.

최근에는 100~200nSec 사이의 짧은 펄스폭을 사용하는 레이더의 등장으로 주파수 측정 정확도는 물론 고속 순시 위상측정 및 주파수데이터 생성능력이 요구되고 있으므로 디지털 신호처리부에서 빠르고 정확한 주파수연산 알고리즘과 보정 주파수 Look-up Memory의 참조 단수 최소화 방안도 같이 고려되어야 한다.

II. 본 론

1. 주파수 측정기 개요

주로 사용되는 주파수 측정기로는 슈퍼헷 방식 YIG Tunner구조의 주파수 계수기(Frequency Counter) 및 동일하게 슈퍼헷 방식으로 입력 신호를 하향 변환하여 FFT를 수행하는 FFT(Furrier Frequency Transform) 수신기가 있다.

본 논문에서 논의되는 다채널 지연라인을 경유하는 고주파신호가 주파수에 따라 위상이 바뀌는 원리를 이용하여 고속 주파수 측정을 수행하는 DFD가 있다.

다음 표1에는 주파수 측정기들에 대한 주요특성을 비교하였다.

표 1 . 주파수 측정기 비교표

구 분	주파수계수기	FFT 수신기	DFD
측정방식	Down Conversion	Down Conversion	IFM
측정속도	수십 ms	수백 us ~ 수 ms	500 ns 이내
측정가능 펄스폭	CW	수 ms ~ CW	100ns ~ CW
정확도	100 Hz 이내	50 kHz 이내	0.5 ~ 2 MHz
적용장비	계측기	통신용 ES 장비	모든 전자전 장비
크기	대형	중형	초소형
환경규격	상온조건	0 ~ 40 °C	-40 ~ 85 °C

2. DFD 동작원리

그림1은 DFD의 기본 동작원리를 나타낸 개념도이다.

DFD의 주요구성품은 ①고주파 입력부, ②디지털처리부, ③주파수보정부로 구성된다.

개략적인 구성과 동작원리를 살펴보면 다음과 같다.

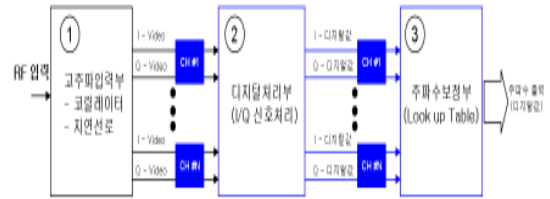


그림 1. DFD 동작흐름도

DFD의 주요구성품은 ①고주파 입력부, ②디지털처리부, ③주파수보정부로 구성된다.

개략적인 구성과 동작원리를 살펴보면 다음과 같다.

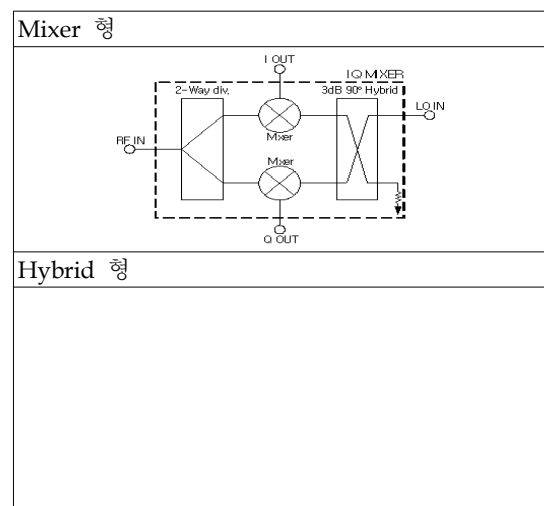
①고주파 입력부는 N개의 채널 수 만큼 I/Q 채널의 비디오를 생성하는 N개의 코릴레이터와 N개의 코릴레이터에 RF 입력을 분기하는 고주파 분배기와 N개의 지연라인을 갖는다. 지연라인과 고주파분배기, 코릴레이터는 한 채널의 경로를 구성하며 RF 입력주파수와 지연라인의 시간이 I/Q 비디오 신호레벨을 결정하는 변수가 된다.

②디지털처리부는 고속 클럭을 이용하여 AD 변환기에 입력되는 I/Q 신호를 양자화 하는 역할을 담당한다. 처리결과로 각 채널의 I/Q 디지털 값이 생성된다.

③주파수보정부는 ①고주파 입력부와 ②디지털처리부의 물리적인 위상오차, 온도로 인한 위상오차와 양자화 오차를 보상하여 최종 주파수 값을 디지털화 하여 제공한다. 주파수 보정부는 실시간으로 주파수 값을 제공하기 위하여 일반적으로 고속 비휘성메모리를 이용하여 Look up Table로 구현된다.

3. DFD에서 코릴레이터와 Delay line의 구현

코릴레이터는 DFD를 구성하는 핵심 부품으로 Mixer형 또는 Hybrid 형으로 구현되며, 동작원리는 동일하다.



DFD에서 코릴레이터의 동작원리는 Mixer형 코릴레이터 기준으로 설명한다.

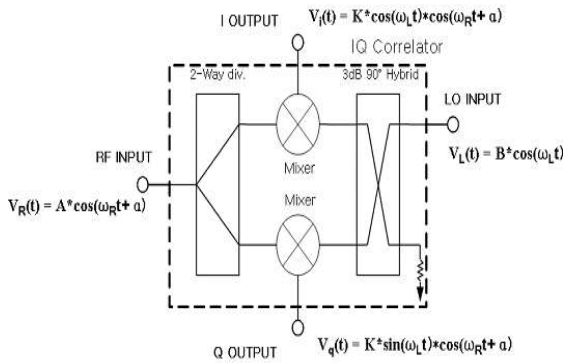


그림 2. Mixer형 코릴레이터 동작원리

A: Amplitude
 ω : 측정주파수
 α : Delay 위상차

그림2에서 RF Input과 LO Input에 입력되는 주파수가 동일하므로 $\omega_L = \omega_R$ 이라 볼 수 있다.

그러므로, 코릴레이터의 출력 $V_i(t)$, $V_q(t)$ 는 식-(1)과 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

코릴레이터 I OUTPUT;
 $V_i(t) = K * \cos(\omega_L t) * \cos(\omega_R t + \alpha) = (K/2) * \cos(2\omega_R t + \alpha) + (K/2) \cos(\alpha)$ ----- (식-1)

코릴레이터 Q OUTPUT;
 $V_q(t) = K * \sin(\omega_L t) * \cos(\omega_R t + \alpha) = (K/2) * \sin(2\omega_R t + \alpha) + (K/2) \sin(\alpha)$ ----- (식-2)

$V_i(t)$, $V_q(t)$ 의 신호를 LPF(Low Pass Filter)를 사용하여 고주파 성분을 제거하면 다음과 같은 (식-3), (식-4)의 결과를 얻을 수 있다.

코릴레이터 I OUTPUT;
 $V_i(t) = (K/2) \cos(\alpha)$ ----- (식-3)

코릴레이터 Q OUTPUT;
 $V_q(t) = (K/2) \sin(\alpha)$ ----- (식-4)

코릴레이터 RF INPUT에 적용되는 α (Delay 위상차)에 따라 코릴레이터의 I/Q OUTPUT이 변경됨을 알 수 있다.

여기에서, (식-3)과 (식-4)를 이용하여 (식-5)를 얻을 수 있다.

$\alpha = \tan^{-1}(V_q(t)/V_i(t)) = 2 * \text{PI} * f * \tau$ ----- (식-5)
 τ : Delay line으로 인한 지연시간

그러므로 코릴레이터의 RF INPUT에 Delay line을 추가하여 (식-5)에 따라 주파수 값을 산출할 수 있음을 알 수 있다.

위의 결과를 실제 DFD 구현을 위해 적용할 때에는 측정 주파수 정확도와 모호성 해결을 위한 수단을 반드시 고려하여 Delay line은 선정되어야 한다.

그림3과 4는 협대역 DFD에 2채널 Delay line을 적용하여 구현한 예이다.

한 채널에는 모호성을 해결하기 위해 DFD 사용주파수 대역폭(OPERATING BANDWIDTH)에

마진을 두어 DFD 입력주파수 대역폭 (Unambiguity Bandwidth)을 기준으로 1배의 지연라인(1λ)을 사용하고, DFD 주파수 측정정확도를 만족하기 위해 DFD 입력주파수 대역폭 (UNAMBIGUITY BANDWIDTH)을 기준으로 4배의 지연라인(4λ)을 선정하였다.

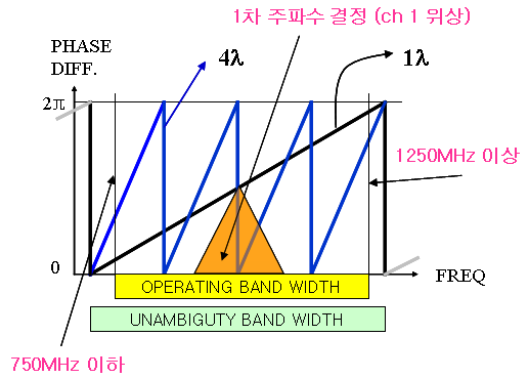


그림 3. 2-채널 협대역 DFD의 Delay line선정

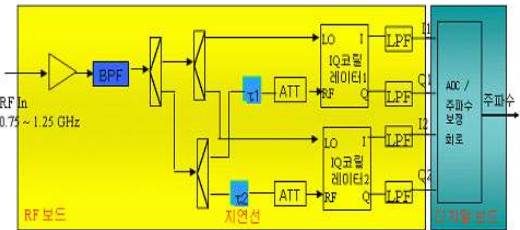


그림 4. 2-채널DFD 블록다이어그램

4. 디지털처리부와 주파수 보정부 구현

디지털처리부는 고속 AD 변환기로 각 채널의 I/Q 비디오신호를 정량적인 디지털 데이터로 변환한다. 이 디지털 데이터는 DFD의 고주파입력부의 고주파 경로에서 발생하는 물리적인 위상오차, 온도로 인한 위상오차, 채널간 이득편차로 인한 오차 등 비선형적인 오차와 디지털처리부의 양자화 오차를 보상하여 최종 주파수 값을 디지털화 하여 제공하여야 한다.

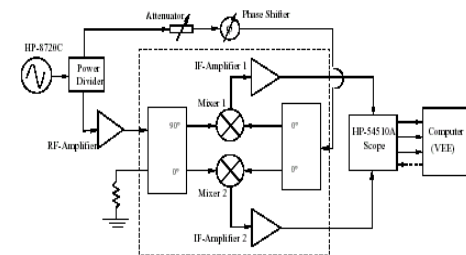


그림 5. 위상 변위기를 이용한 오차보정

실제로 코릴레이터의 I/Q 신호를 측정한 디지털 데이터는 많은 오차를 포함하고 있다. 그러므로 초광대역 DFD 구현시, 이 오차보정은 주파수 정확도 향상을 위해서 필수적으로 수행되어야 한다.

주파수 보정부는 실시간으로 주파수 값을 제공하기 위하여 일반적으로 고속 비휘성메모리를 이용하여 Look up Table로 구현된다.

그림 5는 위상 변위기를 이용한 오차 보정 Set-up도이다.

오차 보정은 주파수, 신호세기 및 위상 등 모든 발생 가능한 요소에 대해 적용된다.

III. 광대역 4채널 DFD 설계

1. 광대역 4채널 DFD 동작 및 설계

광대역 4채널 DFD는 광대역 처리와 높은 해상도 및 주파수정확도를 구현하기 위해 4개의 지연선을 사용하여 설계되었다.

광대역 4채널 DFD는 E에서 J밴드를 걸쳐 짧은 펄스를 안정적으로 측정할 수 있도록 설계하였고, 전기적/기구적 시뮬레이션을 활용하여 제작 전에 미리 설계의 적합성을 확인하였다.

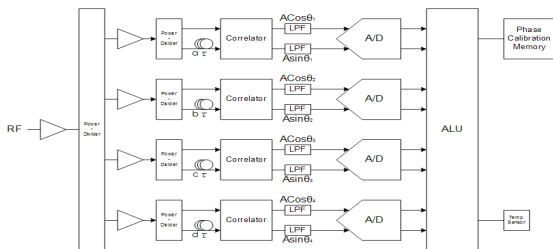


그림 6. 광대역 DFD의 구조

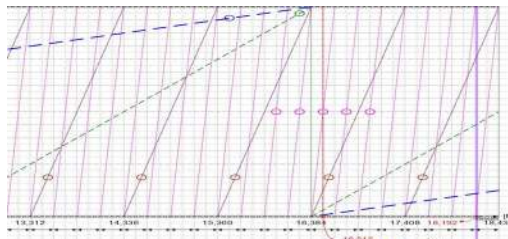


그림 7. 4채널 Delay line 시뮬레이션

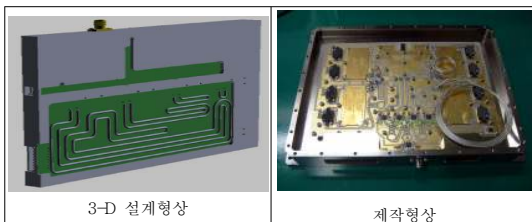


그림8. 광대역 4채널 DFD 형상

2. DFD 성능비교

외국의 경우에는 2-6[GHz], 6-18[GHz]의 중대역

DFD를 개발하여 사용하고 있다.

광대역 4채널 DFD는 E-J Band에 이르는 초광대역에서 전기적성능을 만족하면서 군수용으로 사용가능한 소형, 견고화 모듈로 구현하였다. 다음은 중대역 DFD2종과 광대역 4채널 DFD의 주요 성능을 비교한 표이다.

구분	A20-MH123 (AKON 사)	A20-MH124 (AKON 사)	광대역4채널 DFD
주파수범위	2-6[GHz]	6-18[GHz]	E-J Band
대역폭	5120[MHz]	12288[MHz]	16000[MHz]
정확도(RMS)	1.5MHz 이하	3MHz 이하	3MHz 이하
해상도	14 bit binary	14 bit binary	15 bit binary
정재파비	21 이하	21 이하	21 이하
크기 [mm]	185*152*32	228*178*32	200*150*25
운용모드	내부/외부트리거	내부/외부트리거	내부/외부트리거

3. 향후 해결과제

2옥타브 이상 광대역 소자나 부품, 모듈을 구현함에 있어 비선형적인 특성을 보정하는 것은 매우 중요하다.

주파수 범위가 넓어질수록 이득이나 위상 편차를 정교하게 보정해 줄 필요성이 있다.

본 논문에서 제안한 초광대역 DFD는 사용온도 환경 및 제작상의 오차를 보완할 수 있는 오차보상을 적용하고 있다.

향후에는 보정의 최소화과 더불어 크기가 큰 지연라인을 대체할 만한 광섬유와 같은 신소재 활용도 고려되어야 할 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 전자정보(SIGINT)영역에서 활용성이 높은 DFD를 4채널 지연라인구조의 초 광대역 DFD에 대해 연구하였다.

최근에 100~200nSec 사이의 짧은 펄스폭을 사용하는 레이더의 출현으로 주파수 측정 정확도는 물론 고속 순시 주파수 측정능력이 요구되고, 향후 무인기에 장착될 신호정보(SIGINT) 수집기나 전자전(EW) 수신기에 사용하기 위해서는 초소형화, 경량화에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

[1] P.W. East, B.Sc(Eng), "Design Techniques and Performance of Digital IFM". IEE PROC., vol.129 Pt. F, No. 3, June 1982

[2] James Bao Yen Choi, "Microwave Receivers with electronic warfare applications", Florida: Krieger Publishing Co., 1992 pp.183-188