

Telemeter 방식 Torque 센서 개발

김수광 ◦ 김태용
 산업과학기술연구소 제어연구부

A Development of Torque Sensor using Telemeter Techniques

Soo Kwang Kim ◦ Tae Yong Kim
 RIST Control Dept.

ABSTRACT

This paper describes the 2-channel telemeter system using AM(Amplitude Modulation) - FM (Frequency Modulation) techniques suitable for measurement of spindle torque by strain gage. In order to evaluate the developed system, the model tests were performed for test specimens. The developed system was installed on the plate mill and it was possible to measure and analyze the torque signal of spindle.

1. 서론

Shaft, Spindle 및 Back-up Roll Bearing 등의 대형 회전 구조물이 동작 중에 결함이 발생하였을때 경우에 따라서는 즉시 보수가 필요하므로 이로인해 생산공정에 지장을 초래할수 있으며, 무리한 설비의 사용으로 대형사고를 유발하여 막대한 재산손실과 인명피해를 입을 수도 있다. 따라서 정확한 설비 진단을 통해 각 설비의 상태파악 및 수명예측을 하게되면 대형 설비사고의 예방과 설비고체의 준비 계획 수립 등 효율적인 설비관리를 할수 있다. 산업체에서는 On-Line 설비 상태 감시장치인 CMS(Condition Monitoring System)를 통해 설비 관리를 행하고 있으며, CMS에 사용하는 각종 Sensor 중 압연기의 축 Torque를 측정하여 Motor의 과부하 및 Spindle의 열화를 감시할 목적으로 Torque Sensor를 사용하고 있다. 하지만 Telemeter 방식의 Torque Sensor는 국산화 개발이 되어 있지 않아 외국으로부터 도입하고 있으며, [1,2] 대형 Spindle 진단을 위한 Torque Sensor는 아직 개발이 완료되지 않은 상태이며 측정기술 및 Data 처리 Software에 대한 Know-how 의 이전 기피 등으로 어려움이 많다.

본 연구에서는 압연기의 축 Torque 를 측정하여 Motor의 과부하 및 Spindle 의 열화를 감시하기 위한 Torque Sensor 를 국산화 개발하여 압연기의 Torque 측정 및 CMS 에 이용하고자 한다.

2. 압연구동계에서의 Torque

압연구동계의 하중설계는 Spindle Shaft를 중심으로하였을때, 압연되는 강판의 반력 즉 Vertical 방향의 Bending력과 접선 방향의 Torque를 받게된다. [3,4] Shaft에 가해지는 최대 Torque와 전단 응력 τ 는 식 (1), (2)로 표시 된다.

$$T = 0.975 \frac{W}{N} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{T}{J} \quad (2)$$

(T:Torque(Kg-m), W: Motor 출력(Kw), J:극 관성 Moment)

또한 Shaft의 임의의 위치에 가해지는 Bending력은 식 (3)으로 표시 되며 합성 응력은 식 (4)로 표시 할수 있다.

$$\sigma_b = \frac{M * r_{max}}{I} \quad (3)$$

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_b}{2} \left\{ \left(\frac{\sigma_b}{2} \right)^2 + \tau^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$TAF = \frac{\text{Peak Torque}}{\text{Average Torque}} \quad (5)$$

(I:단면 2 차 Moment(Moment of Inertia), r_{max} :

Spindle 최대 반경 M : Moment)

4 Active Strain Gage를 이용한 응력 측정은 식 (6)에 의해 구한다.

$$T = 0.975 \frac{W}{N} = \frac{\pi * D^3 * G * \epsilon}{32} \quad (6)$$

(T:Torque(Kg-m), D:축경 N:회전수, G:횡탄성 계수

ϵ : 비틀림 량, W: Motor 출력 (Kw))

상기 식을 종합하면 압연이 수행될 때 압연 강종과 압연 량에 따른 M을 관리하면 측정된 비틀림 값으로 Shaft 하중 상태의 관리가 가능하다.

3. Telemeter 방식 System 구성도

3.1 시스템 개요

회전체 Spindle의 Torque를 측정하기 위해 AM-FM(Amplitude Modulation-Frequency Modulation) 방식의 Telemeter System을 구성하였다. 본 시스템은 회전체의 비접촉식 계측에 해당하므로 큰 송신 출력이 필요치 않으며, 상하부 Spindle에 설치되므로 상호간의 전자기 간섭 효과를 고려하여 송신 출력은 1mW로 하였으며 송수신 안테나 간의 거리는 약 10 cm로 하였다.[5] 송신부 전원은 DC 12 Volt, 4000mAh 용량의 충전 Battery와 이를 충전시키기 위한 Solar Cell로 구성된다. 표 1 에 송수신기의 사양을 나타내었다.

| Items | Specification |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1.Modulation Form | AM-FM |
| 2.Carrier Frequency | 20kHz, 10MHz,12MHz |
| 3.Strain Gage Signal Frequency | DC - 200 Hz |
| 4.Channels | 2 |
| 5.Transmitter Power | 1 mW |
| 6.Transmitter Power Source | DC12V, Battery Charging by Solar Cell |

표 1. 시스템 사양.
Table 1. System Specification.

그림 1 은 송수신기 Block Diagram을 나타 내는데, 회전체 축이 변형 될때 발생 되는 변위를 Strain Gage를 사용하여 Strain을 감지한다. 감지되는 신호는 DC 영역에서 부터 수 백 Hz 정도의 저주파 신호 인데 신호 분석에 필요한 부분만을 여파하여 변조 시키는 것이 전체시스템의 성능을 향상 시키므로 본 송수신 시스템의 신호 처리주파수 범위는 DC 에서부터 200Hz 까지이다. 또한 이 주파수를 직접 FM(Frequency Modulation) 변조시키려면 FM에서의 주파수 편이가 작아서 복조가 힘들기 때문에, 먼저 Gage 신호를 20 kHz정도의 AM(Amplitude Modulation) 변조후 이를 Gage 신호의 전압 크기에 비례하는 주파수를 출력하는 Direct FM 방식을 사용해야 한다.

Gage에서의 출력은 수 millivolt 정도의 미약한 신호 이므로 이를 송신 하는데 적합한 신호로 만들기 위해서는 Preamplifier를 사용해 한다. 본 연구 에서는 회전체에 송신기가 취부 되어 동작되므로 가능한한 송신부를 소형 경량으로 설계 되어야 하므로 Strain Gage

Signal Conditioner를 사용하였다.

센서 출력은 AM 변조 회로를 통해 FM 변조회로에 입력되는데 이는 VCO(Voltage Controlled Oscillator)와 Buffer 회로로 구성 된다. 이 VCO는 Gage 신호의 크기에 비례 하는 주파수를 발생 시킨다. 여기서 FM Carrier Frequency 는 10, 12 MHz로 정하였는데, 이는 일반 방송용 주파수 대역인 88 - 108 MHz 대역을 사용할 경우 온도, 진동 및 공급 전압의 변동 등의 요인으로 인해 송신기의 발진 주파수가 불안정해지며 안정된 발진을 얻기 위해서는 복잡한 회로가 사용 되어 송신기 크기가 증가 된다. 따라서 시스템 전체의 성능을 저하 시키는 결과가 된다. 또한 수신기에서 원하는 Strain Gage 신호를 복조하기 위해서는 88 - 108 MHz 의 송신 주파수를 중간 주파수인 10 MHz로 낮추어서 복조해야 하므로 고주파 혼합기 국부 발진기 및 중간 주파 증폭기가 필수적으로 사용 되어야 한다.

이러한 단점을 없애기 위해 본 시스템에서는 송신 주파수를 중간 주파 대역인 10 MHz 대역으로 하였다. 각 Channel의 변조된 Gage 신호는 Antenna Matching Unit를 통해 각각의 송신 Loop Antenna로 송출 된다.

또한 수신 Loop Antenna를 통해 수신된 신호는 고주파 증폭기에서 복조 가 능한 Level로 증폭 된다. 증폭된 신호는 FM 복조기와 AM 복조기를 통해 원래의 Strain 변위 신호로 복조된 후 Data 처리 Computer에의 입력을 위해 잡음에 강한 20mA Current Loop 신호 변환기에 입력되어

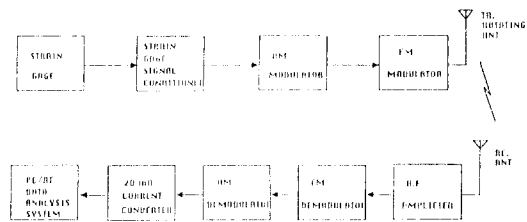


그림 1. 송수신기 구성도.
Fig.1 Block Diagram of AM- FM Transmitter/Receiver.

전류로 변환된 Strain 신호는 전압 신호로 다시 변환되어 Analog/Digital 변환 Board를 거쳐 Computer에 입력되어 Data 처리가 이루어 진다. Data 처리 Software는 Menu Driven 방식으로 사용자가 원하는 Key를 누르면 해당 Menu 가 화면에 표시된다.

3.2 송신 시스템

3.2.1 Strain Gage Signal Conditioner

Strain이란 정해진 길이에 대해 외부 응력에 따른 길이 변화분의 비로 정의 되는데, 실제의 응력 변위를 측정하기 위해서는 Strain Gage가 사용 된다.

본 연구에 사용된 Gage는 전단 응력용 Gage로 Gage 저항이 350 ohm인 Bridge 형태의 Strain Gage를 사용하였

다.[6]

Gage에서 출력되는 전압의 크기는 수 mV에서 수십 mV 정도의 크기이므로 변조에 적합한 크기로 만들기 위해서는 증폭기가 사용되어야 한다. 본 시스템 개발에서는 증폭율과 Strain Gage 출력 Offset 조정, Gage 신호의 주파수 처리 범위를 조정 가능하게 하고, Gage에 가해지는 Excitation Voltage의 안정된 전압을 출력하는 Strain Gage Signal Conditioner를 사용하였다.

3.2.2 변조 회로

변조 회로는 AM 변조부와 FM 변조부로 구성되는데, AM, FM 변조의 Carrier Frequency는 각각 20kHz, 10 MHz, 12MHz 이다.

송신기가 회전체에 취부되어 동작하므로, 소형 경량이어야 한다. 본 시스템에서는 AM 변조를 위해서, 발진 주파수를 외부에 연결된 저항 과 Timing Capacitor에 의해 조정이 가능한 Single Chip AM Modulator를 사용하였다.

FM 변조 회로는 Gage 신호의 전압 크기에 비례하는 주파수를 출력하는 VCO(Voltage Controlled Oscillator)와 Buffer 회로로 구성하였으며, 변조 지수를 0.7로 하여 주파수 편이가 14 kHz로 되게 하였다..

3.3 수신 시스템

3.3.1 고주파 증폭기

송신 Loop Antenna를 통해 송출된 AM-FM 변조된 Gage 신호는 수신 Loop Antenna에 의해 수신되어 Antenna Matching Unit를 거쳐 고주파 증폭기에 입력된다.이 증폭기는 10 -20MHz의 주파수 범위에 대해 평탄한 주파수 특성을 지니며, 입출력 Impedance 는 각각 50 ohm 이고 이득은 20 dB이다.

3.3.2 복조기

고주파 증폭기로부터 증폭된 수신 변조 신호는 원래의 신호를 재생하기 위해 복조기에 입력된다. AM-FM으로 변조되었기 때문에 수신 복조기의 구성은 FM-AM 복조기의 형태가 된다. 즉 먼저 FM 복조 후 AM 복조기를 거치면 원래의 Gage 신호를 얻을수 있다.

사용된 FM 복조기는 외부에 Coil 이나 Inductor 가 필요없이 선택적으로 주파수 Tuning 및 Filtering 이 가능한 PLL(Phase Locked Loop)을 사용하였다.

AM 복조기는 Carrier Frequency 100 MHz까지 사용 가능한 Synchronous AM Detector를 사용하여 원래의 Gage 신호를 복조하였고, 전압 조정 회로를 통해 Data 처리 Computer와의 통신을 위해 20mA Current Loop 변환기에 입력 된다.

3.4 현장 설치 System

구성된 Telemeter System의 현장 적용을 위해 압연기 Spindle 상하부에 설치하여 실제 Torque를 측정 하였다. 구성된 System은 진동 온도 습도 등의 현장 조건을 고려하여 개발되었다.

먼저 Torque 측정을 위한 Strain Gage는 Aluminum Protection Housing Type으로 Spindle 축과 평행하게 취부 하였으며 송신기 Module및 전원 공급용 Battery는

Frame을 제작하여 내부에 설치하였다. Battery 충전용 Solar Cell은 Frame 외부에 90° 각도로 4개를 취부하였으며, 외부 조명은 400W의 고압 나트륨 Lamp를 Solar Cell과 200mm 떨어진 위치에 설치하였다.[7] 또한 Frame 및 송신용 Loop Antenna는 Spindle에 취부되어 회전하므로 Belt형의 구조물로 Spindle에 접촉제를 사용하여 부착 설치하였으며 수신용 Loop Antenna는 Spindle을 지지하는 Carrier Metal Bearing 부에 취부하였다. 송수신 Antenna 간의 거리는 100mm를 유지하였고, 송신기 Module과 센서간의 거리는 약 300mm이며 수신 Antenna와 복조기 사이의 거리는 8 Meter로 하였다.또한 각 Module 간의 연결은 Shield Cable을 사용하여 현장의 Motor, Switch 등의 Noise Source를 최대한으로 억제시켰다. 그림 2 는 전체 System Layout를 나타낸다.

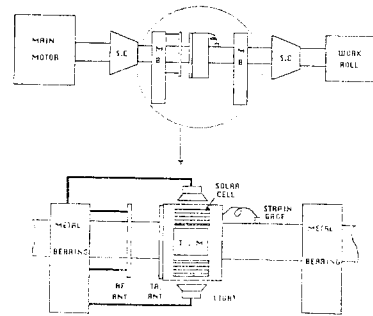


그림 2. 현장 설치 시스템 구성도.
Fig.2 The Layout of Wireless Telemeter System installed on Plate Mill.

4. Data 처리 Software

4.1 시스템 Flow Chart

20mA Current Loop를 통해 전송된 Torque 신호는 Data 분석 처리를 위해 Computer에 입력 되는데, 먼저 Analog 신호를 Digital로 변환하기 위해 A/D Board에 입력 된다. 그림 3은 본 Telemeter System의 Software 구성도를 나타내는데, On-Line으로 Data를 수집하는 Routine과 각종 Menu를 표시하는 Routine 및 사고 발생시 Data를 해석하는 Accident Analysis Routine으로 구성된다.

그림 4에 On-Line Data Gathering Rutine의 Flowchart를 나타내었는데, 먼저 화면을 초기화 시키면 User Menu 화면이 표시된다. Computer 내부에서는 압연재가 입력 되었는지를 Check하고 압연재가 입력되었으면 상하부 Spindle에 대해 Torque data를 읽는다. 이 값으로부터 Torque Data를 환산 하고, Accident Analysis를 위해 File에 Index를 부여한다. 이 Data가 최근의 Data이면 File을 Open,Save 하고 Close한다. 이때까지 압연이 계속되고 있으면 위의 작업을

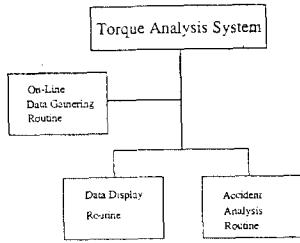


그림 3. 소프트웨어 구성도
Fig. 3 Software Structure.

반복하고 압력이 끝났으면 평균 및 최대 Torque를 계산하고 월보 File에 Save된다.

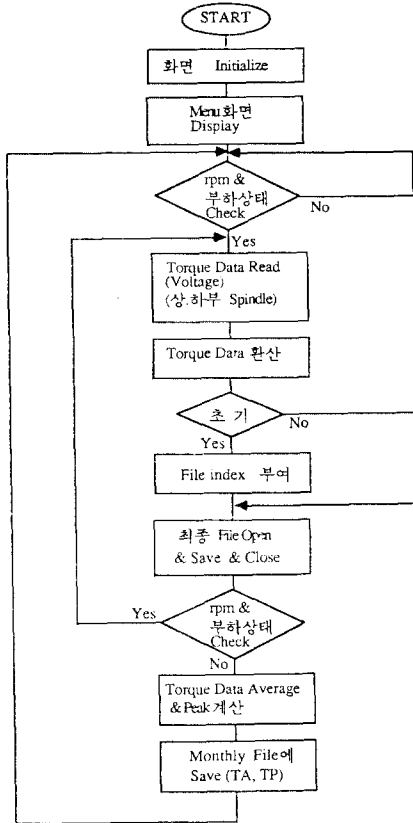


그림 4 실시간 데이터 수집 루틴.
Fig. 4 Flowchart of On-Line Data Gathering Routine.

4.2 시스템 Menu

System을 초기화 했을때 표시되는 User Menu 화면을 나타내는데, 제공되는 Menu는 다음과 같다. 먼저 현재 압연되고 있는 Torque Data를 On-Line으로 표시하는 매회 측정 Data 표시 화면과 상하부 Spindle Data의 평균 및 최대 Torque 분포, TAF 분포 등을 월별로 표시하는 각종 도표 표시 화면으로 구성 된다. 또한 Spindle 관리를 Master File과 사고 발생시 전회 및 전전회의 압연 Data를 표시하는 사고 해석 Mode로 구성 된다.

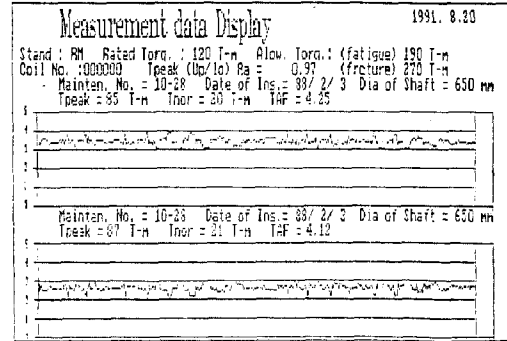


그림 5 매회 측정 데이터 표시.
Fig. 5 Data Display of Each Measurement.

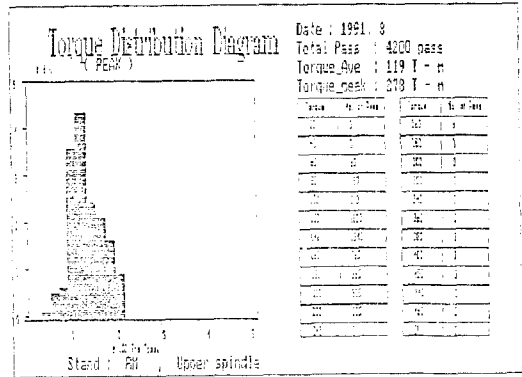


그림 6 토크 분포도
Fig. 6 Torque Distribution.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 의사 신호에 의한 송수신 특성

본 Telemeter System이 정상적으로 동작하는 지를 확인하기 위해서 기지의 신호인 2 - 200Hz의 정현파를 송신기 입력단에 가하여 송신 Loop Antenna를 통해 변조파를 송출한후, 이를 수신 Loop Antenna로 수신하여 신호가 복조되는지를 확인하였다. 그림 7은 송수신 파형을 나타내는데 Oscilloscope Channel 1은 송신된 의사 신호이고 Channel 2가 복조된 파형을 나타내는데, 송수신 특성이 우수함을 알 수 있다. 또한 송수신기가 회전체에 취부되어 회전함으로써 발생하는 잡음과 주변의 잡음으로 인한 영향을 관측하기위해 기지의 의사 신호 발생기를 회전체에 취부하여 송신기와 같이 회전시켜 송수신 특성을 측정한 결과 전혀 영향이 없음을 알 수 있었다.

5.2 Strain Gage에 의한 송수신 특성

실제 Strain Gage 신호에 의한 송수신 특성을 살펴보기 위해 금속 시편에 Gage를 취부하여 외부에 충격을 가한 경우 발생하는 Strain 출력 신호와 이를 변복조하여 계속

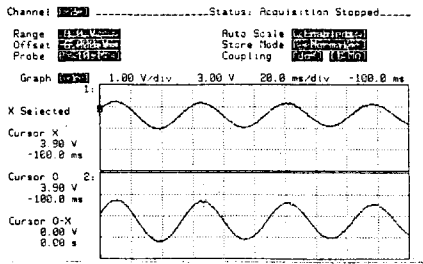


그림 7 테스트 신호에 의한 복조 특성.
Fig. 7 AM-FM Demodulation Characteristics by Test Signal.

한 신호를 비교하였다. 그림 8은 각 Channel에 대해 Strobe Oscilloscope로 Trigger Mode를 사용하여 관측한 파형을 나타내는데, 그림의 Chan 1(상부 파형)은 변 복조하기 전의 원래의 신호를 나타 내며, Chan 2(하부 파형)가 변복조를 거친 파형을 나타 내는데 송수신 특성이 우수함을 알수 있다.

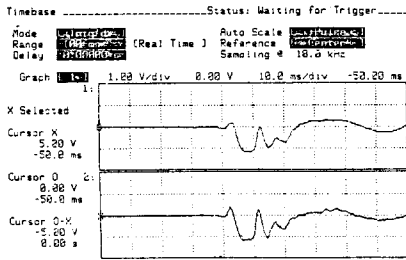


그림 8 응력 변위 게이지에 의한 복조 특성.
Fig. 8 AM-FM Demodulation by Strain Gage Signal.

5.3 현장에서 계속된 Torque 신호 특성

개발된 Telemeter System을 현장의 압연기 Spindle에 설치 하여 Torque를 계속하였다. 그림 9는 SS41 압연제에 대해 실제 계속된 하부 Spindle의 Strain을 나타 내는데, 최고치는 약 400 $\mu\epsilon$ 을 나타 냈으며 평균치는 약 250 $\mu\epsilon$ 을 나타 내었다. 10회 정도의 압연에 대해 계속을 수행한 결과 각각 비슷한 압연 형태를 보였는데, 2회분에 해당하는 압 연 측정치를 그림 9에 나타 내었다.

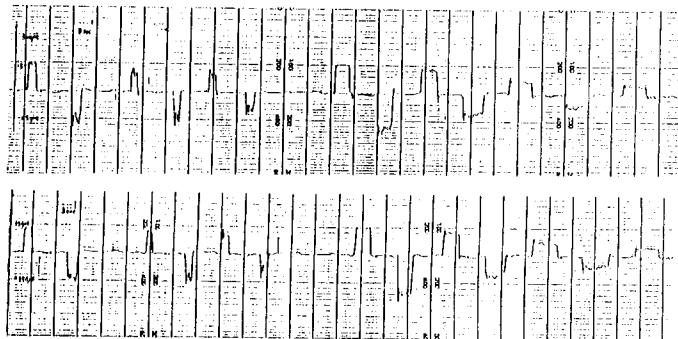


그림 9 현장에서 계속된 토크 신호.
Fig. 9 Torque Data in Plate Mill.

6. 결론

Spindle Torque 측정을 위해 AM-FM 방식의 Telemeter System을 개발하였다. 송수신 성능 및 Torque 신호 특성을 분석하기 위해 시편에 Ggage를 취부하여 송수신 특성을 분석하였으며, 회전체 Simulator를 구성하여, 시편에 부하를 가한 상태에서의 Torque 신호의 송수신 특성 분석하였다. 또한 개발된 System을 현장 압연기에 설치하여 압연시의 Torque를 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 송신 출력이 1mW이고 주파수 대역이 DC - 200 Hz인 AM-FM 방식의 Telemeter System을 구성한 결과, 복조된 신호로부터 Torque 특성 분석이 가능하였다.
- 2) 현장 압연기 Spindle에 설치하여 Torque를 계속한 결과 SS41 압연제에 대해 하부 Spindle의 평균 Strain은 약 250 $\mu\epsilon$ 으로 측정 되었으며, 최고치는 약 400 $\mu\epsilon$ 으로 계속 되었다.

7. 참고 문헌

- 1) 東京電業(株), 軸 torque/rotor 溫度 監視 裝置 (TM 6325), Technical Manual, 1986.
- 2) 共和電業(株), ひすみ ケ-シによる ひすみ 測定.
- 3) 小山建次, 久保田伸夫, 壓延機驅動系におけるしり振動に關する諸問題, 三菱電氣技報, Vol. 48 No. 2, 1974.
- 4) 1 熱延工場 粗壓延機 上部 Spindle 切損 調査報告書, 産業科技研, 1988.
- 5) 金泰容, AE Telemetry System 개발(1), 産業科技研, 1989.
- 6) Kyowa, Strain Gage with Protection Housing, No. 5/226.
- 7) Panasonic, Solar Cells Technical handbook.
- 8) Chris Bowick : RF Circuit Design, Howard W. Sans and Co. Inc.
- 9) Ulrich L. Rhode : Digital PLL Frequency Synthesizers, chapter 4, Prentice - Hall Inc.
- 10) Data Translation, DT 2811 User Manual.