

논문 2006-43TC-5-22

# 밀리미터파 복사계의 온도보정에 관한 연구

## (Thermal calibration of Millimeter-wave radiometer)

채연식\*, 김순구\*, 이응호\*\*, 이진구\*

(Yeon-Sik Chae, Soon-Koo Kim, Eung-Ho Rhee, and Jin-Koo Rhee)

### 요약

본 논문에서는 밀리미터파 복사계(Millimeter-wave radiometer)를 제작하고 이것을 이용하여 특정 물체의 밀리미터파 방사 에너지를 측정하기 위한 온도보정에 관한 연구를 수행 하였다. 물체에서 방사되는 열잡음 신호를 수신하여 증폭하고 검파회로를 거쳐 DC전압으로 출력하는 35GHz 대역의 근거리 디케형(Dicke type) 복사계를 제작하고, 복사계의 온도 보정과 그 특성을 소개한다. 온도범위 299K ~ 309K 에서는 온도 증가에 따른 밀리미터파 복사계의 출력전압이 매우 선형적인 결과를 얻었으며, 이 범위의 온도에서 미지의 흑체 복사에너지의 상대적인 양을 밀리미터파 복사계를 이용하여 측정이 가능하다. 또한 액체질소를 이용해 측정 온도 범위를 확대하여 실험한 결과 상온부근에서의 온도에 대한 출력전압의 선형성 보다는 오차의 범위가 커지는 경향을 보였다. 실험한 온도 범위 214K ~ 309K에서 온도와 출력전압과의 관계,  $V = 0.03259K - 9.71289$  을 얻었다.

### Abstract

We have built the close range Dicke type radiometer with 35GHz of frequency, which consists of two stage low noise amplifier and diode detector to calibrate temperatures of materials. We have present thermal calibration methods using millimeter-wave radiometer. Output voltages linearly increase with temperatures between 299K and 309K. We are able to measure lower temperature using the liquid nitrogen although results are somewhat unstable.

**Keywords :** millimeter-wave radiometer, Dicke, thermal calibration.

### I. 서론

밀리미터파 복사계(Millimeter wave radiometer)는 물체로부터의 고유의 주파수 대역 흑체복사(Blackbody radiator)이론에서 시작된다<sup>[1]</sup>. 복사계는 물체에서 방사되는 에너지 또는 반사하는 에너지를 측정하는 장치이다. 밀리미터파를 이용한 복사계는 구름, 연기, 먼지 등의 장애물이 있는 경우 가시광선 또는 적외선 감지 시스템이 얻기 힘든 물체에 대한 정보를 얻는데 유용하게 사용될 수 있다. 또한 지표면의 눈의 두께나 수분의 정

도, 식물의 종류와 분포, 광물질의 종류와 분포정도를 파악하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다<sup>[2]</sup>. 밀리미터파를 이용한 복사계는 실생활에서 사용되는 포장 제품의 검사, 은닉 무기의 탐지, 자동차의 충돌방지 레이더, 비행기의 착륙 보조 장치, 산사태 등의 자연 재해에 대한 감지 등에도 응용할 수 있다<sup>[3]</sup>. 이와 같이 응용성이 매우 다양한 복사계의 형태는 크게 능동형과 수동형 두 가지로 나눌 수 있으며, 방사에너지 전체를 수신하는 전전력형과 참조 신호를 이용하여 비교하는 디케형 수신기가 있다. 본 논문에서는 35GHz 대역의 근거리 디케형(Dicke type) 복사계<sup>[4]</sup>를 제작하여 복사계의 온도 보정과 그 특성을 소개한다. 밀리미터파 복사계는 특정 물체의 복사 에너지를 감지하기 위해서는 기준이 될 수 있는 열잡음을 측정하여 출력되는 전압은 선형성이 유지되어야만 한다. 특히 열잡음의 변화가 매우 작은 경우를 측정하기 위해서는 온도에 따른 출력 전압의 선형성은 매우 중요하다. 밀리미터파 복사계의 선형성은

\* 정회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터  
(Millimeter-wave Innovation Technology Research center)

\*\* 정회원, 수원대학교 정보통신공학과  
(Suwon University)

※ 본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (MINT)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 (ERC) 지원금에 의하여 수행되었습니다.

접수일자: 2005년12월30일, 수정완료일: 2006년5월15일

제작에 사용된 각각의 저잡음 증폭기와 검파기의 성능에 좌우되지만, 제작이 된 후 전체적인 시스템의 온도 보정, 즉 측정영역에서의 선형성을 검증해야 한다. 본 연구에서는 근거리 밀리미터파 복사계의 밀리미터파 영역에서 흑체 복사에 따른 복사계의 보정과 물체로부터 방사하는 밀리미터파 에너지의 감지에 따른 시스템 출력 전압과 그에 대응하는 온도의 관계식을 얻었다.

## II. 측정 및 데이터 처리

### 1. 밀리미터파 복사계의 제작

밀리미터파 복사계의 제작에 있어서 저잡음 증폭기는 시스템 전체의 성능에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 자연계에서 방사되는 열잡음은 거의 노이즈와 같은 정도의 전력을 나타내므로 잡음과 방사되는 열잡음을 구분하기 위해서는 잡음지수 성능이 매우 우수한 것을 선택해야 한다. 또한 검파기의 최소 신호감지 전력까지의 증폭이 증폭단에서 이루어 져야 한다. 이것을 고려하여 본 연구에서 사용된 증폭단은 Quinstar Technology사의 저잡음 증폭기를 2단으로 사용했고, 각각의 증폭기는 중심 주파수 35GHz에서 이득이 34dB, 잡음지수가 2.8dB이다. 검파기는 감도가 1000mV/mW 이고, 최소 신호감지 전력은 -56dBm인 Quinstar Technology사 검파기를 사용했다. 안테나는 혼 안테나를 사용했으며, SPDT 스위치를 이용하여 물체에서 방사되는 열잡음과 Cal. LOAD단을 반복적으로 스위칭 하도록 제작하였다. 흑체로 사용된 전파 흡수체는 EMERSON&CUMING사의 AN-77을 사용하였다. 제작된 시스템의 구성도를 그림 1에 나타냈으며, 그림 2는 제작된 시스템의 사진이다.

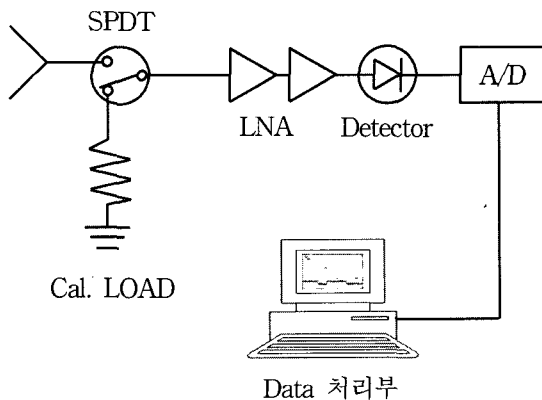


그림 1. 시스템 구성도  
Fig. 1. Diagram of the millimeter wave radiometer.

측정시 외부의 영향을 최소한으로 감소시키기 위하여 외벽을 알루미늄판을 이용하여 차단하였으며, 안쪽 면은 전파 흡수체로 차단하여 내부에서 반사되는 전자파의 영향을 최소화 하였다. 그림 3은 제작된 시스템과 측정에 사용된 구조물 사진이며, 그림 4에 측정물체가

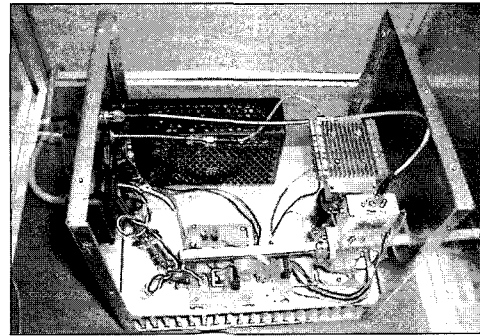


그림 2. 제작된 시스템 사진  
Fig. 2. Millimeter wave radiometer setup. (top view)

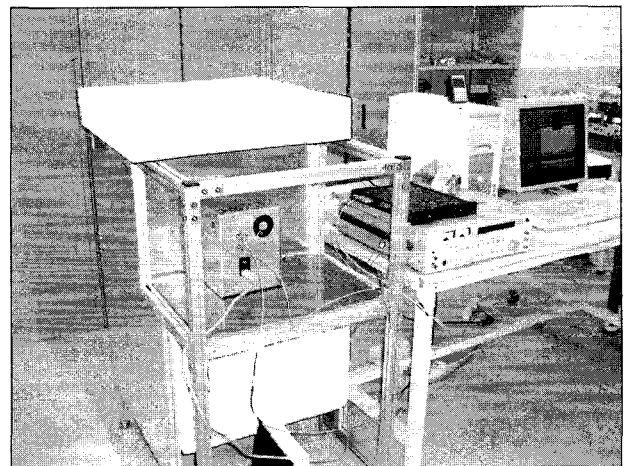


그림 3. 측정 시스템 전체 구성  
Fig. 3. Photograph of the assembled system.

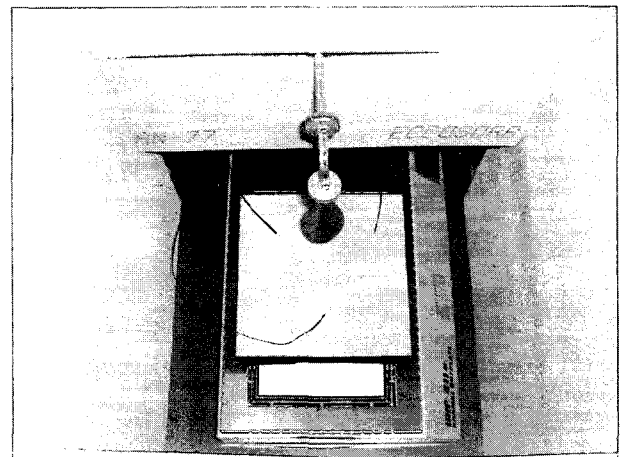


그림 4. 측정 부분의 내부 구조  
Fig. 4. Horn antenna was positioned on a material for measurement.

위치하는 내부의 사진을 나타내었다.

## 2. 밀리미터파 복사계를 이용한 측정방법

밀리미터파 복사계를 이용하여 흑체의 열잡음을 측정하기 전에 저잡음 증폭기 및 검파기의 안정적인 동작을 위해 1시간 정도의 예열 시간이 필요하다. 전원이 공급된 직후의 평균 출력전압은 1시간 정도의 예열을 시킨 출력전압보다 3.5 % 정도 높게 나타났다. 그러므로 예열시간이 1시간 이상 충분히 이루어진 상태에서 측정을 하였다. 측정에 사용된 흑체 대응 전파 흡수체 크기는 25×25cm이며, 안테나로부터 25cm 거리를 유지하게 한다. SPDT스위치는 PC의 데이터 수집 보드를 이용하여 40Hz의 주기를 갖는, 5V와 0V의 구형파를 입력하여, 반복적으로 안테나와 Cal. LOAD단에 교대로 스위칭 되도록 하였다. 데이터 수집을 위하여 PC의 데이터 수집 보드는 1개의 스위칭 제어 단자와 3개의 J-type 열전대 측정단자, 그리고 1개의 전압측정용 단자를 사용하였다. J-type 열전대 측정은 흑체표면의 각 부분 온도의 분포를 정확하게 하기 위해 3곳에 설치하여 각 부분의 온도를 측정 하고 평균값을 사용 하였다. 데이터 수집 보드의 샘플링 주파수는 20KHz로 하여 전압 측정용 단자에서 1초에 20,000개의 데이터를 얻는다. 실제 측정은 약 10초간 이루어지며, 얻어진 데이터는 직접 제작한 PC 프로그램에 의해 처리 하였다.

## 3. 데이터 처리

제작된 밀리미터파 복사계를 이용하여 측정된 안테나로부터 수신되는 흑체 열잡음신호와 Cal. LOAD로부터 입력되는 신호를 구분하기 위해 PC에서 데이터 처리를 해야 한다. PC 데이터 처리를 위해 스위치에 입력되는 구형파를 90° 늦추어 입력하고, 이것을 기준으로 하여 PC프로그램에서 동기화 하도록 하였다. Cal. LOAD로부터 얻어진 데이터를 분석한 결과 데이터의 분포가 평균값을 중심으로 가우시안 분포를 이루므로 산술평균을 구하여 참조신호로 사용하는 것은 타당한 것으로 사료된다<sup>[5]</sup>.

그림 5에 흑체온도 307.2K에서 얻어진 데이터의 일부분을 나타내었다. 스위치 제어신호가 5V 일때 Cal. LOAD로부터 입력되는 신호이며, 0V 일때 표준 혼 안테나로부터 수신되는 흑체 열잡음 신호이다. 그림 5에 나타낸 데이터는 안테나로부터 수신되는 열잡음과 Cal. LOAD로부터 입력되는 신호를 1초간, 즉 SPDT 스위치 on/off를 40주기동안 처리한 데이터이다. 데이터 처리

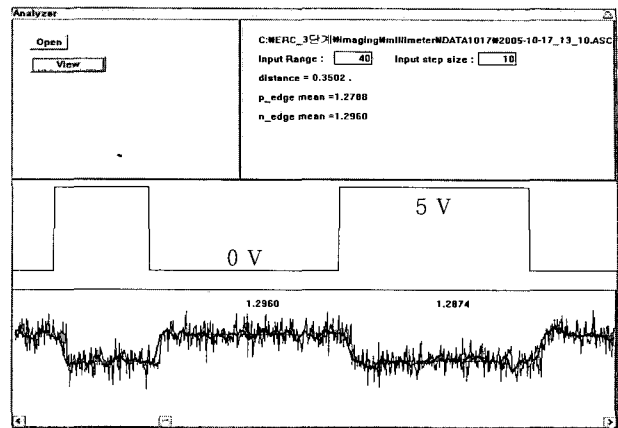


그림 5. 측정 데이터의 일부분

Fig. 5. One part of measurement data.

그림에서 Input Range 값 40이 이것을 의미하며, Input step size 10은 20kHz로 샘플링된 데이터 20,000개를 10개씩 산술평균한 것을 의미하며 진한 실선으로 표시하였다. p\_edge mean과 n\_edge mean은 Cal. LOAD와 안테나로 각각 들어오는 신호의 DC 출력전압을 산술평균한 값이다. 그림에서 보이는 distance 값 0.3502는 1주기(0.25 sec) 동안의 차이를 1초간 누적하여 얻은 데이터이며, 본 실험의 데이터는 모두 1초를 기준으로 하여 얻었다.

## III. 결과 및 논의

제작된 밀리미터파 복사계를 충분히 예열한 후 밀리미터파 복사계를 이용하여 흑체로 사용된 전파 흡수체의 온도를 변화시키면서 두 구간으로 나누어 검파기의 출력 전압을 측정 하였다. 상온보다 높은 온도는 전열기를 사용하여 온도를 높이고 전파 흡수체의 온도가 평형상태에 이르도록 충분히 기다린 후에 검파기의 출력 전압을 측정하였다. 저온은 액체질소를 이용하여 냉각시킨 후 시간이 지남에 따라 온도가 상승하는 것을 기다려 열전대로 온도를 측정하고, 이때의 검파기의 출력 전압을 측정하였다.

### 1. 상온 범위 이상에서의 측정

전열기를 켜 상태에서 전파 흡수체의 표면 온도가 평형상태에 이를 수 있도록 충분한 시간을 가열한다. 본 실험에서는 전열기의 온도를 목표온도로 설정하여, 전열기 표면의 온도가 목표온도에 이르도록 한 후 2시간 이상 대기하여, 전파 흡수체의 표면 온도의 변화가 없을 때 평형상태로 간주하고 측정 실험을 하였다. 평형

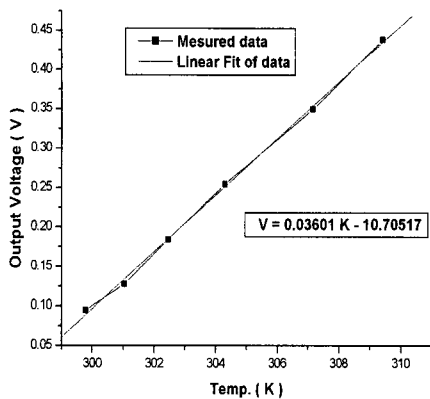


그림 6. 저온 범위 이상에서의 온도와 출력전압 특성

Fig. 6. Relationship between Output Voltage and temperature.

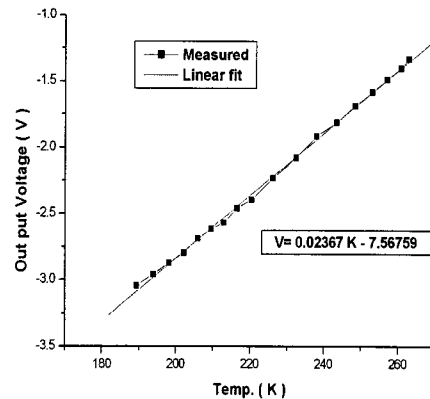


그림 7. 저온 범위 이상에서의 온도와 출력전압 특성

Fig. 7. Relationship between Output Voltage and temperature.

상태에 이르렀을때 전파 흡수체의 표면 온도는 목표 온도보다 낮게 나타났다. 실험 장치 구조상 전열기의 표면 온도와 전파 흡수체의 표면 온도는 큰 차이가 있었다. 그러나 안테나로 방사되는 열잡음은 흡수체의 표면에 의한 것이므로 전파 흡수체의 표면 온도를 기준으로 검파기의 출력 전압을 측정하였다. 전열기의 표면 온도를 363K까지 10K 간격으로 같은 방법으로 측정 실험을 하였다. 전열기의 표면 온도가 363K 일때 전파 흡수체의 표면 온도는 309K를 나타내었다. 측정결과를 그림 6에 나타내었다. 이 결과를 바탕으로 Linear Fitting 하여 전파 흡수체의 온도와 출력전압과의 관계식 (1)을 얻었다.

$$V = 0.03601K - 10.70517 \quad (1)$$

## 2. 저온에서의 측정실험

흑체 대응으로 사용된 전파흡수체의 온도를 최대한 낮추는 방법으로 액체 질소를 이용하였다. 스티로폼 박스에 액체질소를 충분히 넣은 후 전파흡수체가 잠기도록 하였다. 액체질소에 담근 전파 흡수체는 부력에 의해 떠올라 실제 전파흡수체 표면의 온도는 77K까지도 달하지 못했다. 그러므로 전파 흡수체의 표면에 설치된 J-type 열전대의 온도를 기준으로 측정 실험을 하였다. 전파흡수체의 아래에 액체 질소가 남아있는 상태에서 박스 내부의 온도가 평형상태에 이를 수 있도록 1시간 이상 경과한 후 전파 흡수체의 표면 온도와 검파기의 출력전압을 측정한다. 이때의 표면온도를 기준으로 하

여 스티로폼 내부의 온도가 상승하기 시작하는 시점을 액체 질소가 모두 증발한 시점으로 기준을 정한 후 30분 간격으로 온도를 측정하고, 검파기의 출력전압을 측정하는 방법으로 실험을 하였다. 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 온도범위 189K~263K 사이에서 선형적인 결과를 얻었으며, 이 결과를 바탕으로 Linear Fitting 하여 전파 흡수체의 온도와 출력전압과의 관계식 (2)을 얻었다. 이 관계식으로부터 온도 범위 189K~263K에서 방사되는 물체의 방사에너지를 추정할 수 있으며, 추정된 에너지로부터 물체의 온도 상태 등을 유추 할 수 있을 것으로 판단된다.

$$V = 0.02367K - 7.56759 \quad (2)$$

## 3. 전체 측정범위에서의 Linear fitting

상온 부분에서의 측정결과와 저온 범위 189K~263K에서의 측정결과를 바탕으로 측정 온도 전체 범위의 데이터를 Linear fitting 한 결과를 그림 8에 나타내었다. 저온에서의 측정과 상온에서의 측정 결과를 동시에 Linear fitting 했을 경우, 상온과 저온 각각의 결과와는 많은 오차를 나타내었다. 이것은 사용된 저잡음 증폭기와 검파기의 선형성에 기인한 것으로 판단되며, 따라서 전구간에 적용할 수 있는 보정이 아니라 측정 온도 범위를 나누어 보정을 하여 물체의 열잡음을 측정하면 문제가 없을 것으로 판단된다. 189K~309K 범위에서 측정된 데이터를 근거로 Linear fitting 했을 경우 식(3)을 얻었다.

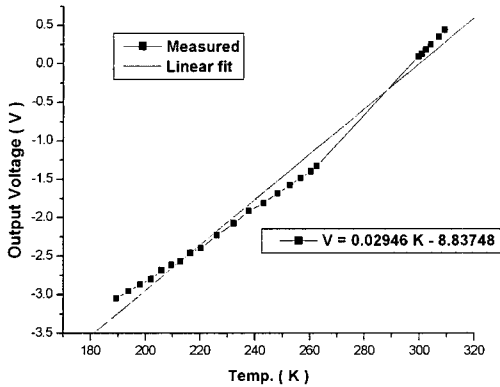


그림 8. 측정 범위 전체에서의 온도와 출력전압 특성  
 Fig. 8. Relationship between Output Voltage and temperature measured data.

$$V = 0.02946K - 8.83748 \quad (3)$$

#### IV. 결 론

밀리미터파 복사계와 온도 측정 장치를 제작하고, 이를 이용하여 흑체로 사용된 전파 흡수체의 온도변화에 따른 검파기의 출력 전압을 측정하였다. 각각의 299K~309K 온도범위와 189K~263K 온도범위에서는 온도에 따른 열잡음특성이 매우 양호한 상태의 선형 특성을 보였다. 온도 범위 299K~309K에서는 출력전압과 온도의 관계는  $V = 0.03601K - 10.70517$  을 얻었고, 온도 범위 189K~263K 에서는  $V = 0.02367K - 7.56759$  을 얻었다. 이와 같은 결과는 각각의 온도 범위에서 좋은 직선성을 보이므로 이 시스템을 이용해서 특정물체의 고유 열잡음 전력을 측정하고, 상대적인 온도를 판별할 수 있을 것이다. 측정 범위 전체에서 얻은 검파기의 출력전압과 온도와의 관계  $V = 0.02946K - 8.83748$  은 오차의 범위가 상대적으로 매우 크기 때문에 동일한 전압과 온도 관계식으로 넓은 온도 구간에 걸친 측정은 불가능하며, 측정 물체의 열잡음 전력 변화폭이 작은 것에는 적용하기 어려운 문제점이 있다. 이 문제점을 기술적으로 해결하기 위해서는 저잡음 증폭기 및 검파기의 선형성을 증가시키는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 본 논문에서 제작된 시스템은 측정 온도 구간을 세분하여 구간에 따른 전압과 온도 관계식을 적용하면 정밀한 측정이 가능하며, 열잡음 전력 변화폭이 작은 범위에서도 고유의 물체에 따른 방사율 특성을 고려하여, 물체의 상태 판별이 가능할 것이다. 따라서 이

러한 기능을 응용하면 포장을 개봉하지 않은 상태에서 물체의 감식과 음식물이나 과일 등의 선별에도 응용 가능성이 있다고 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] FAWWAZ T. ULABY, RICHARD K. MOORE, ADRIAN K. FUNG, "MICROWAVE REMOTE SENSING, ACTIVE AND PASSIVE, Vol. 1, Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry." ARTECH HOUSE, pp. 192-205, 1981.
- [2] WILLIAN J. WILSON, R. J. HOWARD, ANTHONY C. IBBOTT, GARY S. PARKS AND WILLIAM B. RICKETTS, "Millimeter-Wave Imaging Sensor," IEEE-MTT, Vol. 34, NO. 10, Oct., 1986.
- [3] N. C. Currie, F. J. Demma, D. D. Ferris, Jr., B. R. Kwasowsky, R. W. Mcmillan, and M. C. Wicks, "Infrared and Millimeter-Wave Sensors for Military Special Operations and Law Enforcement Applications," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 17, No. 7, pp. 1117-1138, 1996.
- [4] David M. Pozar, "MICROWAVE ENGINEERING , Third Edition," John Wiley & Sons, pp. 669-670, 2005.
- [5] Steven M. Kay, "FUNDMENTALS OF STATISTICAL SIGNAL PROCESSING, Vol. 1, ESTIMATION THEORY," PRENTICE HALL, CHAPTER 1, 1993.

저 자 소 개



채 연 식(정회원)  
 1997년 동국대학교 대학원  
 전자공학과 석사,  
 2002년 동국대학교 대학원  
 전자공학과 박사  
 <주관심분야 : 밀리미터파 응용,  
 반도체소자>

김 순 구(정회원)  
 2004년 8월 전자공학회 논문지  
 제 41 권 SD 제 8 호 참조

이 응 호(정회원)  
 1989년 동국대학교 대학원 전자공학과 석사,  
 2000년 동국대학교 대학원 전자공학과 박사.  
 2001년~현재 수원대학교 정보통신공학과  
 초빙 교수

이 진 구(정회원)  
 2005년 5월 전자공학회 논문지  
 제 42 권 TC 제 5 호 참조