

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**YÜKSEK FREKANSLI ÇOK DÜŞÜK GÜÇLERİN  
KARAKTERİZE EDİLMESİ VE ÖLÇÜLMESİ**

**MURAT CELEP**

**KOCAELİ 2013**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**YÜKSEK FREKANSLI ÇOK DÜŞÜK GÜÇLERİN**  
**KARAKTERİZE EDİLMESİ VE ÖLÇÜLMESİ**

**Y. Müh. Murat CELEP**


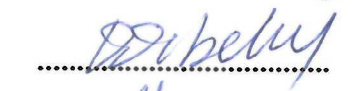



**Yrd. Doç. Dr. Arif DOLMA**  
**Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Prof. Dr. Doğan DİBEKÇİ**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Prof. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Prof. Dr. A. Arif ERGİN**  
**Jüri Üyesi, GYTE**

**Doç. Dr. Alp Oral SALMAN**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2013**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

RF ve mikrodalga alanında gelişen teknolojilere paralel olarak günümüzde iletişim ve benzeri alanlarda da bir çok gelişmeler sağlanmıştır. Örneğin artık daha az güç tüketen devre/cihaz/sistemler ile çok daha küçük işaretler verimli bir şekilde işlenebilmektedir. Elektriksel gürültü ve işaretin güç değeri, düşük işaretler ile çalışan bir devre/cihaz/sistem için iki kritik parametredir. Mikrodalga frekanslarındaki ölçümlerde elektriksel gürültü parametresinin belirlenmesi amacıyla referans cihaz olarak gürültü kaynakları kullanılmaktadır. Gürültü kaynaklarının karakterizasyonu ise, mikrodalga gürültü ölçme sistemleri ile yapılmaktadır. Bir ulusal metroloji enstitüsünün, uluslararası sisteme izlenebilir (traceability) bir ölçüm gerçekleştirebilmesi için gereken standart gürültü ölçme sistemi ticari olarak bulunmamaktadır. Öte yandan günümüzde kullanılan ölçme sistemleri genellikle tek bir frekans bölgesinde (örneğin 12 GHz – 18 GHz) ölçüm yapmaktadır.

Gürültü ölçümleri için oldukça geniş bantlı olarak kabul edilen 50 MHz – 26,5 GHz frekans bölgesinde çalışan, toplam güç radyometre yöntemi ile oluşturulan bir gürültü ölçme sistemi tasarlanmış, kurulmuş ve test edilerek belirsizliği hesaplanmıştır. Bu gürültü ölçme sistemi kullanılarak bir yarı iletken gürültü kaynağı ölçülmüş ve ölçüm sonuçları gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları birbirileri ile uyum içerisinde elde edilmişlerdir. Diğer bir parametre olan düşük güç ölçümleri için toplam güç radyometre revize edilerek bir güç ölçme sistemi oluşturulmuş ve sistemin matematiksel modeli çıkarılarak hesaplamaları yapılmıştır. Yeni oluşturulan düşük güç ölçme sistemi ile yapılan ölçümlere ait belirsizlik değeri de hesaplanmıştır. Bu tür bir sistem ile hata modelinin oluşturulması ve izlenebilir ölçümlerin yapılması bir ilktir. Elde edilen sonuçlar ve belirsizlikler, düşük güç ölçümlerinin izlenebilir bir şekilde gerçekleştirilebilmesine yönelik umut vermektedir.

Tezin her aşamasında bana desteğini eksik etmeyen tez danışmanım, çok değerli hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Arif DOLMA'ya, teorik ve pratik olarak desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK UME çalışanları ve aynı zamanda mesai arkadaşlarım Sn. Şenel YARAN, Sn. Cem HAYIRLI, Sn. Özlen TUNCEL, Sn. Yakup GÜLMEZ ve Sn. Cengiz YILMAZ'a, ayrıca bana her zaman destek olan Eşim'e, varlığı ile destek olan Kızım'a, Annem'e, Babam'a, Kardeşlerim'e teşekkür ederim.

Nisan – 2013

Murat CELEP

## İÇİNDEKİLER

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....                                             | i   |
| İÇİNDEKİLER .....                                                   | ii  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                | iv  |
| TABLolar DİZİNİ .....                                               | vi  |
| SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....                                | vii |
| ÖZET .....                                                          | x   |
| ABSTRACT .....                                                      | xi  |
| GİRİŞ .....                                                         | 1   |
| 1. MİKRODALGA GÜÇ .....                                             | 7   |
| 1.1. Mikrodalgada Güç Biriminin Oluşturulması.....                  | 7   |
| 1.2. Mikrok calorimetre .....                                       | 8   |
| 1.3. Güç Algılayıcıları.....                                        | 11  |
| 1.3.1. Bolometre Tipi Algılayıcı.....                               | 11  |
| 1.3.1.1. Bolometre ile güç ölçüm sistemi .....                      | 12  |
| 1.3.1.2. Otomatik köprü metodu.....                                 | 13  |
| 1.3.2. Isıl çift tipi algılayıcı .....                              | 13  |
| 1.3.2.1. Isıl çift ile güç ölçüm sistemi.....                       | 14  |
| 1.3.3. Diyot tipi algılayıcı.....                                   | 15  |
| 1.3.3.1. Diyot ile güç ölçüm sistemi .....                          | 15  |
| 1.4. Güç Algılayıcılarının Karşılaştırılması .....                  | 16  |
| 1.5. Güç Algılayıcılarının Karakterizasyonu .....                   | 17  |
| 2. TOPLAM GÜÇ RADYOMETRE .....                                      | 19  |
| 2.1. Toplam Güç Radyometre Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi.....      | 25  |
| 2.1.1. RF ünitesi .....                                             | 26  |
| 2.1.2. IF ünitesi.....                                              | 32  |
| 2.1.3. Anahtar ünitesi .....                                        | 33  |
| 2.1.4. RF anahtarları .....                                         | 35  |
| 2.1.5. Anahtar kontrol cihazı .....                                 | 36  |
| 2.1.6. Ölçüm yazılımı .....                                         | 36  |
| 2.2. Radyometrenin Karakterizasyonu .....                           | 38  |
| 2.2.1. Ortam gürültü kaynağı .....                                  | 40  |
| 2.2.2. Standart gürültü kaynağı .....                               | 44  |
| 2.2.3. Gürültü kaynağı seçme anahtarı .....                         | 44  |
| 2.2.4. Radyometre .....                                             | 45  |
| 2.2.5. Bilinmeyen gürültü kaynağı.....                              | 48  |
| 3. RADYOMETRE KULLANARAK DÜŞÜK GÜÇ ÖLÇME YÖNTEMİ.....               | 52  |
| 3.1. Düşük Güç Ölçmek için Radyometrede Yapılan Değişiklikler ..... | 53  |
| 3.2. Düşük Güç Ölçme Sistemi Hata Modeli.....                       | 55  |
| 3.3. Düşük Güç Ölçme Sistemi Parametreleri .....                    | 61  |
| 3.4. Düşük Güç Ölçme Sisteminin İyileştirilmesi.....                | 64  |
| 3.5. Sistemin Kazanç Doğrusallığı.....                              | 66  |
| 3.6. Güç Ölçümleri .....                                            | 71  |
| 3.6.1. Güç algılayıcısı ile güç ölçümleri.....                      | 71  |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6.2. Radyometre ile düşük güç ölçümleri.....                             | 76  |
| 3.6.3. Ölçüm belirsizliği.....                                             | 78  |
| 3.6.3.1. Düzeltme katsayısı belirsizliği.....                              | 79  |
| 3.6.3.2. IF adım zayıflatıcı belirsizliği.....                             | 80  |
| 3.6.3.3. Dedektör belirsizliği.....                                        | 80  |
| 3.6.3.4. Doğrusallık belirsizliği.....                                     | 80  |
| 3.6.3.5. Referans güç belirsizliği.....                                    | 81  |
| 3.6.3.6. Bileşik belirsizlik.....                                          | 81  |
| 3.7. Düşük Güç Ölçüm Sonuçları.....                                        | 81  |
| 3.8. Yapılan Ölçümlerin Ölçüm Alıcısı Sonuçları ile Karşılaştırılması..... | 84  |
| 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                               | 91  |
| KAYNAKLAR.....                                                             | 94  |
| EKLER.....                                                                 | 101 |
| KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....                                              | 125 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                              | 127 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                                   |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1.  | Mikrodalga güç ölçüm sistemi blok şeması .....                                    | 7  |
| Şekil 1.2.  | Mikrodalga güç standartlarının izlenebilirlik zinciri .....                       | 8  |
| Şekil 1.3.  | a) Mikrok calorimetre kütlesi ve b) mikrok calorimetre sistemi .....              | 10 |
| Şekil 1.4.  | Barreter ve termistorun sıcaklık katsayıları .....                                | 12 |
| Şekil 1.5.  | Otomatik köprü ile güç ölçüm sistemi .....                                        | 13 |
| Şekil 1.6.  | Isıl çift prensip şeması .....                                                    | 14 |
| Şekil 1.7.  | Isıl çift güç ölçüm devresi .....                                                 | 15 |
| Şekil 1.8.  | Diyot ile güç ölçüm devresi .....                                                 | 16 |
| Şekil 1.9.  | Değişik tip güç algılayıcılarına göre güç seviyeleri .....                        | 17 |
| Şekil 1.10. | Kalibrasyon faktörü ölçümü .....                                                  | 17 |
| Şekil 2.1.  | Toplam güç radyometre blok gösterimi .....                                        | 20 |
| Şekil 2.2.  | Toplam güç radyometredeki işaret akışı .....                                      | 21 |
| Şekil 2.3.  | Toplam güç radyometresi ile gürültü ölçme .....                                   | 23 |
| Şekil 2.4.  | Sıcaklık değişimine karşılık radyometre davranışı .....                           | 24 |
| Şekil 2.5.  | Kurulan toplam güç radyometre blok gösterimi .....                                | 26 |
| Şekil 2.6.  | 50 MHz – 500 MHz RF devresi .....                                                 | 27 |
| Şekil 2.7.  | 500 MHz – 26,5 GHz RF devresi .....                                               | 27 |
| Şekil 2.8.  | Tipik bir LNA'nın devrede kullanılması .....                                      | 28 |
| Şekil 2.9.  | LNA kazancının giriş ve çıkış empedansına bağlı değişimi .....                    | 29 |
| Şekil 2.10. | LNA kazancının yük empedansına bağlı değişiminin ölçüm düzeneği .....             | 30 |
| Şekil 2.11. | LNA kazancının yük empedansına bağlı değişimi .....                               | 31 |
| Şekil 2.12. | Mikrodalga anahtar yapısı .....                                                   | 31 |
| Şekil 2.13. | Bakır blok üzerine mikrodalga malzemelerin montajlanmış hali .....                | 32 |
| Şekil 2.14. | IF ünitesi .....                                                                  | 33 |
| Şekil 2.15. | Anahtar kontrol ünitesi ve mikrodalga anahtarlar .....                            | 34 |
| Şekil 2.16. | Anahtar kontrol elektronik şeması .....                                           | 34 |
| Şekil 2.17. | Anahtar kontrol cihazı arka panel görüntüsü .....                                 | 36 |
| Şekil 2.18. | Ölçüm yazılımının akış diyagramı .....                                            | 39 |
| Şekil 2.19. | Gürültü kaynağı ölçümünde kullanılan yazılımın arayüzü .....                      | 40 |
| Şekil 2.20. | Ortam gürültü kaynağı devresi ve fotoğrafı .....                                  | 41 |
| Şekil 2.21. | Ortam gürültü kaynağı direnci ve fiziksel sıcaklığı .....                         | 42 |
| Şekil 2.22. | Ortam gürültü kaynağının çıkış gürültü sıcaklığı .....                            | 43 |
| Şekil 2.23. | Ortam gürültü kaynağının gürültü sıcaklığı belirsizliği .....                     | 43 |
| Şekil 2.24. | Anahtar etkinlikleri ve uyumsuzluk katsayıları .....                              | 46 |
| Şekil 2.25. | Toplam güç radyometre fotoğrafı .....                                             | 47 |
| Şekil 2.26. | Radyometre girişine gürültü kaynakları bağlı iken, radyometre çıkış güçleri ..... | 48 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.27. Radyometre girişine gürültü kaynakları bağlı iken, radyometre çıkış güçlerinin standart sapması..... | 48 |
| Şekil 2.28. Bilinmeyen gürültü kaynağı gürültü sıcaklığı .....                                                   | 51 |
| Şekil 3.1. Toplam güç radyometre ile CW güç ölçme .....                                                          | 53 |
| Şekil 3.2. Radyometrenin CW güç ölçümleri için düzenlenmesi .....                                                | 53 |
| Şekil 3.3. Sistemin hata modeli .....                                                                            | 55 |
| Şekil 3.4. İndirgenmiş hata modeli .....                                                                         | 56 |
| Şekil 3.5. İndirgenmiş hata modeli kısımları.....                                                                | 57 |
| Şekil 3.6. Birinci kısım hata düzeltmesi ve değişim aralığı .....                                                | 62 |
| Şekil 3.7. Birinci ve ikinci kısım değişimleri .....                                                             | 63 |
| Şekil 3.8. Radyometre giriş yansıma katsayısı .....                                                              | 64 |
| Şekil 3.9. İyileştirilmiş sistem .....                                                                           | 65 |
| Şekil 3.10. Birinci kısım hata düzeltmesi ve değişim aralığı.....                                                | 66 |
| Şekil 3.11. İyileştirilmiş sistemin birinci ve ikinci kısım değişimleri .....                                    | 67 |
| Şekil 3.12. Sistemin doğrusallık test düzeneği a) fotoğrafı, b) blok şeması .....                                | 68 |
| Şekil 3.13. Radyometrenin doğrusallık değerleri.....                                                             | 70 |
| Şekil 3.14. Radyometrenin azaltılmış doğrusallık değerleri .....                                                 | 71 |
| Şekil 3.15. Güç algılayıcısı ile DUT gücü ölçme.....                                                             | 71 |
| Şekil 3.16. Düşük güç ölçme sistemi fotoğrafı .....                                                              | 77 |
| Şekil 3.17. Düşük güç ölçme sistemi doğrulama düzeneği .....                                                     | 84 |
| Şekil 3.18. 0,1 GHz güç değerleri.....                                                                           | 85 |
| Şekil 3.19. 0,5 GHz güç değerleri.....                                                                           | 86 |
| Şekil 3.20. 1 GHz güç değerleri.....                                                                             | 86 |
| Şekil 3.21. 4 GHz güç değerleri.....                                                                             | 87 |
| Şekil 3.22. 8 GHz güç değerleri.....                                                                             | 87 |
| Şekil 3.23. 12 GHz güç değerleri.....                                                                            | 88 |
| Şekil 3.24. 15 GHz güç değerleri.....                                                                            | 88 |
| Şekil 3.25. 18 GHz güç değerleri.....                                                                            | 89 |
| Şekil 3.26. 22 GHz güç değerleri.....                                                                            | 89 |
| Şekil 3.27. 26,5 GHz güç değerleri .....                                                                         | 90 |

## TABLolar DİZİNİ

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1. Anahtar seçme tablosu .....                                                                                                          | 37 |
| Tablo 2.2. Konnektör tanımlaması ve bağlantıları .....                                                                                          | 37 |
| Tablo 2.3. Standart gürültü kaynağı sertifika değerleri.....                                                                                    | 44 |
| Tablo 2.4. Bilinmeyen gürültü kaynağı sertifika değerleri .....                                                                                 | 49 |
| Tablo 2.5. Bilinmeyen gürültü kaynağının ölçüm sonuçları ile<br>hesaplanan gürültü sıcaklığı değerleri .....                                    | 50 |
| Tablo 3.1. İkinci kısım hata düzeltmesi ve değişim aralığı .....                                                                                | 63 |
| Tablo 3.2. İyileştirilmiş sistemin ikinci kısım hata düzeltmesi ve<br>değişim aralığı.....                                                      | 66 |
| Tablo 3.3. 10 GHz için doğrusallık ölçümleri .....                                                                                              | 69 |
| Tablo 3.4. -60 dBm ile -120 dBm aralığındaki giriş güçlerinde 50<br>MHz -500 MHz frekans aralığı için radyometre<br>doğrusallık değerleri ..... | 69 |
| Tablo 3.5. Güç algılayıcısına ait parametreler .....                                                                                            | 72 |
| Tablo 3.6. 0 dBm ile -70 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu.....                                                                                      | 73 |
| Tablo 3.7. 0 dBm ile -70 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) .....                                                                         | 74 |
| Tablo 3.8. -60 dBm ile -120 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu.....                                                                                   | 81 |
| Tablo 3.9. -60 dBm ile -120 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri<br>(k=2) .....                                                                   | 83 |



## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

|          |                                                        |
|----------|--------------------------------------------------------|
| $A$      | : Attenuator (zayıflatıcı) saçılma parametresi         |
| $B$      | : Bant genişliği, (Hz)                                 |
| $C$      | : Kapasitans, (F), Celsius                             |
| $F$      | : Frekans, (Hz)                                        |
| $G$      | : Gain (kazanç)                                        |
| $h$      | : Plank sabiti, (J s)                                  |
| $I$      | : Akım, (A)                                            |
| $k$      | : Boltzmann sabiti, (J/K), Kapsam faktörü              |
| $M$      | : Empedans uyumsuzluğu                                 |
| $n$      | : Ölçüm sayısı                                         |
| $P$      | : Güç, (W)                                             |
| $R$      | : Direnç, ( $\Omega$ ), Radyometre saçılma parametresi |
| $s$      | : Saçılma parametresi, Standart sapma                  |
| $u$      | : Belirsizlik                                          |
| $U$      | : Genişletilmiş belirsizlik                            |
| $x$      | : Bilinmeyen değer                                     |
| $Y$      | : Y katsayısı, Yükselteç saçılma parametresi           |
| $\Gamma$ | : Reflection coefficient (yansıma katsayısı)           |
| $\Delta$ | : Değişim                                              |
| $\eta$   | : Effective efficiency (etkin verimlilik)              |
| $\theta$ | : Faz                                                  |
| $\mu$    | : Ortalama değer                                       |
| $\rho$   | : Yansıma katsayısı büyüklüğü                          |
| $\tau$   | : Zaman sabiti, (s)                                    |
| $\Omega$ | : Ohm                                                  |

### Alt İndisler

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| $A$       | : Ambient (ortam), Zayıflatıcı |
| $a$       | : Ortam                        |
| $b$       | : Bileşik                      |
| $f$       | : Forward (ileri)              |
| $g$       | : Generator (kaynak, üreteç)   |
| $i$       | : Input (giriş)                |
| $in$      | : Input (giriş)                |
| $L$       | : Load (yük)                   |
| $lin$     | : Lineerite                    |
| $m$       | : Measurement (ölçme), metre   |
| $o$       | : Output (çıkış)               |
| $o_{ref}$ | : Referans çıkış               |
| $R$       | : Radyometre                   |
| $r$       | : Reverse (geri)               |
| $ref$     | : Referans                     |

|            |                             |
|------------|-----------------------------|
| <i>s</i>   | : Sensor                    |
| <i>ss</i>  | : Standart anahtar kanalı   |
| <i>SYS</i> | : Sistem                    |
| <i>sx</i>  | : Bilinmeyen anahtar kanalı |
| <i>u</i>   | : Unknown (bilinmeyen)      |
| <i>x</i>   | : Bilinmeyen                |
| <i>y</i>   | : Yükselteç                 |

### **Kısaltmalar**

|          |                                                                                                                  |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A        | : Akım (A)                                                                                                       |
| AC       | : Alternating Current (Alternatif Akım)                                                                          |
| AF       | : Audio Frequency (Ses Frekansı)                                                                                 |
| BNM-LNE: | Bureau National de Metrologie-Laboratoire National d'Essais (Metroloji Ulusal Bürosu - Ulusal Test Laboratuvarı) |
| BIPM     | : Bureau International des Poids et Mesures (Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu)                             |
| CMC      | : Calibration and Measurement Capability (Kalibrasyon ve Ölçme Yeteneği)                                         |
| CW       | : Continuous Wave (Sürekli Dalga)                                                                                |
| D        | : Diyot                                                                                                          |
| dB       | : Decibel                                                                                                        |
| dBm      | : Decibel Mili Watt                                                                                              |
| DC       | : Direct Current (Doğru Akım), (A)                                                                               |
| DUT      | : Device Under Test (Test Edilen Cihaz)                                                                          |
| ENR      | : Excess Noise Ratio (Aşırı Gürültü Oranı)                                                                       |
| GHz      | : Giga Hertz                                                                                                     |
| IF       | : Intermediate Frequency (Ara Frekans)                                                                           |
| ISO      | : International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)                           |
| K        | : Kelvin                                                                                                         |
| KF       | : Kalibrasyon Faktörü                                                                                            |
| kHz      | : Kilo Hertz                                                                                                     |
| LNA      | : Low Noise Amplifier (Düşük Gürültülü Yükselteç)                                                                |
| MHz      | : Mega Hertz                                                                                                     |
| mW       | : Mili Watt                                                                                                      |
| NIST     | : National Institute of Standards and Technology (Teknoloji ve Ulusal Standartlar Enstitüsü)                     |
| NBS      | : National Bureau of Standards (Standartlar Ulusal Bürosu)                                                       |
| NPL      | : National Physical Laboratory (Ulusal Fizik Laboratuvarı)                                                       |
| NTC      | : Negative Temperature Coefficient (Negatif Sıcaklık Katsayısı)                                                  |
| ppm      | : Parts Per Million (Milyonda Bir)                                                                               |
| PTB      | : Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Fizik ve Teknik Federal Ajansı)                                         |
| pW       | : Piko Watt                                                                                                      |
| RF       | : Radio Frequency (Radyo Frekansı)                                                                               |
| RRE      | : Royal Radar Establishment (Kraliyet Radar Kuruluşu)                                                            |
| SI       | : Le Système International d'unités (Uluslararası Birimler Sistemi)                                              |
| STD      | : Standart                                                                                                       |

SWR : Standing Wave Ratio (Duran Dalga Oranı)  
TÜBİTAK : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu  
UME : Ulusal Metroloji Enstitüsü  
V : Volt, (V)  
W : Watt  
 $\mu$ A : mikro Amper  
 $\mu\Omega$  : Mikro Ohm

## YÜKSEK FREKANSLI ÇOK DÜŞÜK GÜÇLERİN KARAKTERİZE EDİLMESİ VE ÖLÇÜLMESİ

### ÖZET

Mikrodalga devrelerinin önemli parametrelerinden biri olan elektriksel gürültünün karakterize edilmesinde gürültü kaynakları kullanılır. Gürültü kaynaklarının, 50 MHz – 26,5 GHz frekans aralığında kalibrasyonunu/karakterizasyonunu yapmak için bir toplam güç radyometre tasarlanmış, kurulmuş ve karakterize edilmiştir. Geliştirilen toplam güç radyometre kullanılarak değeri bilinen bir gürültü kaynağının ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu ölçümlere ait belirsizlik değeri hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler ve belirsizlik değerleri ile gerçek değer ve belirsizlikleri karşılaştırıldığında toplam güç radyometrenin istenilen performansı başarı ile sağladığı gösterilmiştir. Bu çalışmada, toplam güç radyometre sistemi sürekli dalga (CW) işaretli -70 dBm – -120 dBm aralığındaki düşük güç seviyelerini ölçebilmek için modifiye edilmiştir. Değiştirilen sistemin hata modeli çıkarılarak belirsizlik bileşenleri belirlenmiş ve belirsizlik hesaplaması yapılmıştır. Geliştirilen sistem kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar, bir ölçüm alıcısı kullanılarak gerçekleştirilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar, düşük güç ölçümlerinin bu sistem ile, izlenebilir bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Böylece bir gürültü ölçme sistemi geliştirilerek CW işaretli güç ölçümü gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Belirsizlik, Gürültü Kaynağı, Gürültü Sıcaklığı, Mikrodalga Güç, Toplam Güç Radyometre.

## **CHARACTERIZATION AND MEASUREMENT OF THE VERY LOW POWER WITH HIGH FREQUENCY**

### **ABSTRACT**

Noise sources are used to characterize the electrical noise which is one of the important parameters of microwave circuits. In order to characterize/calibrate the noise sources in the frequency range between 50 MHz and 26.5 GHz, a total power radiometer was designed, established, and characterized. Using the total power radiometer, a known noise source was measured and the uncertainties were calculated. The comparison of the measurement results and the actual values have shown that the total power radiometer provides the desired performance successfully. In this study, the total power radiometer system has been modified to measure the low level power of a CW signal in the range of -70 dBm – -120 dBm. An error model of the modified system was derived then the uncertainty components were determined and the expanded uncertainty was calculated. The results of the measurement obtained from the modified system, were compared with the results obtained from a measurement receiver. The results have shown that the traceable low power measurements can be accomplished by using the modified system. Thereby, CW signal power measurements were performed using the developed noise measurement system.

**Keywords:** Uncertainty, Noise Source, Noise Temperature, Microwave Power, Total Power Radiometer.

## GİRİŞ

Einstein 1905 yılında Brownian hareketi üzerine gerçekleştirdiği çalışmada, sıvı içerisindeki moleküllerin rastgele hareketinin durağan parçacıklara olan etkisiyle parçacığın rastgele hareket ettiğini göstermiştir [1]. J. B. Johnson 1928 yılında, iletkenler üzerinde gerçekleşen ısıl değişimden dolayı iletken içerisindeki elektrik yükünde de benzer bir rastgele hareketin oluştuğunu göstermiştir [2]. Johnson, iletken uçlarında bir potansiyel fark meydana gelmesine sebep olan elektrik yükündeki bu rastgele değişimin etkisini bir yükselteç kullanarak ölçmüş ve gürültü olarak isimlendirmiştir. Günümüzde ise bu etki Johnson gürültüsü olarak bilinmektedir. Johnson'ın bu çalışmadan elde ettiği sonuçları, aynı yıl Nyquist teorik olarak ispatlamıştır [3]. 1946 yılında Dicke, Johnson gürültüsü ve ısıl yayılım arasında bir ilişki olduğunu göstermiş ve antenden alınan yayılım ile referans direnç üzerinden alınan yayılım işaretini bir radyometre kullanarak karşılaştırmıştır [4]. 1949 yılında Garrison ve Lawson, sensörü bir direnç olan Johnson gürültü radyometresini tanımlamıştır [5]. Düşük genlik seviyesine sahip olan gürültü işaretini ölçmeye yarayan bu sistemler genel olarak radyometre olarak isimlendirilmektedir [6]. Referans bir direnci esas alan bu ölçüm sistemi günümüzde Dicke radyometre olarak bilinmekte ve mikrodalga gürültü ölçümlerinde kullanılmaktadır [7–13]. Günümüzde, Dicke radyometresinde kullanılan referans direnç yerine gürültü değeri bilinen mikrodalga gürültü kaynakları kullanılmaktadır.

Mikrodalga gürültü kaynaklarının Dicke radyometresinde kullanılması ile radyometreler, uzaktan algılama, elektronik malzemelerin karakterizasyonu, yükselteç ve alıcıların gürültülerinin karakterizasyonu gibi ölçümlerde kullanılmaya başlanmıştır [14, 15]. Standart gürültü kaynakları üzerinden elde edilen gürültü sıcaklığının izlenebilirliğini sağlamak için gürültü kaynaklarının karakterizasyonları radyometre kullanılarak yapılmaktadır. 1960'lı yıllarda mikrodalga gürültü standartlarını ölçmek için Dicke radyometresi üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Günümüzde National Institute of Standards and Technologies - NIST olarak bilinen Amerika Birleşik Devletleri Metroloji Enstitüsü - NBS'den Estin ve Arkadaşları

1960 yılında modifiye edilmiş Dicke radyometresi kullanarak mikrodalga gürültü standardını ölçmüşlerdir [16]. Bu sistemde referans direnç yerine, ürettiği gürültü değeri yüksek bir doğrulukla bilinen standart bir gürültü kaynağı kullanılmıştır. Mikrodalga gürültü kaynağının ölçümünde kullanılan sistem 1964 yılında aynı enstitüden Wells ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır [17]. 1968 yılında Avustralya Metroloji Enstitüsü'nden Somlo ve Hollyway birincil seviye gürültü kaynağının kalibrasyonunu X-bandında çalışan bir dalga kılavuzu radyometre kullanarak yapmışlardır [18]. Günümüzde National Physical Laboratory - NPL olarak bilinen İngiltere Metroloji Enstitüsü – RRE'den Blundell ve arkadaşları 1972 yılında radyometre kullanarak mikrodalga gürültü ölçümü yapmışlardır [19]. 1983 yılında Almanya Metroloji Enstitüsü'nden (PTB) Janik, Dicke radyometresinin ara frekans (IF) kısmına bir referans zayıflatıcı koyarak daha düşük belirsizlik ile ölçüm almak için bir çalışma yapmıştır [20]. Japonya, Elektroteknik Laboratuvarı'ndan Kato ve Yokoshima 1987 yılında Dicke radyometresinin temel alındığı bir radyometre kullanarak 4 GHz frekans bandında çalışan bir radyometre geliştirmişlerdir [21]. Bu radyometrede sıvı azot ile soğutma kullanılarak radyometre duyarlılığı benzerlerine göre artırılmıştır.

Dicke radyometrenin kullandığı anahtarlama sistemi ile radyometre kazancı sürekli kontrol edilmektedir. Dicke radyometrenin kazanç değişimine olan bağımlılığının düşük olmasının büyük bir avantaj olmasına karşılık bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; bant genişliğinin sınırlı olması, tekrarlanabilirliği yüksek bir anahtara ihtiyaç duyması, her frekansta ayar gerektirmesi ve birden fazla frekansın ölçümü için kullanıldığında otomatik kontrole elverişli olmayışıdır. Bundan dolayı sonraki yıllarda farklı radyometre arayışları başlamış ve Dicke radyometre metroloji enstitülerinde mikrodalga gürültü ölçümlerindeki popülaritesini kaybetmeye başlamıştır [22].

1999 yılında Nakano ve Kato, korelasyon tekniğini kullanarak gürültü ölçen bir radyometre geliştirmişlerdir [23]. Dicke radyometresinin sahip olduğu dar bant karakteristiğini aştığını belirttikleri ve geniş bantlı olarak tanıttıkları bu radyometre, 6 GHz ila 12,4 GHz frekans bandında çalışmaktadır. Dicke radyometre dışında metroloji enstitülerinin gürültü ölçümlerinde kullandıkları bir diğer radyometre ise toplam güç radyometredir. Toplam güç radyometre, Dicke radyometresini temel

olarak, Dicke radyometresinin kazanç kararlılığını sağlayan anahtarlama sistemi çıkarılarak elde edilmiştir. Toplam güç radyometre, Dicke radyometre gibi bir antenden alınan düşük seviyeli yayılımın ve tek kapılı bir mikrodalga devre elemanının gürültü sıcaklığı ve empedansının ölçülmesi gibi amaçlarla da kullanılmaktadır [24–26]. Örneğin, bir yükselteç'in gürültü sıcaklığı çok hassas olarak 5 K'den daha düşük olarak ölçülmüştür [27]. Aynı zamanda ticari olarak üretilen yükselteçlerin gürültü değeri de ölçülmüştür [28]. Benzer şekilde yeni geliştirilen gürültü kaynaklarının test edilmesinde de kullanılabilir [29]. Toplam güç radyometrenin hassas gürültü ölçümlerinde kullanılması için araştırmalar yapılmıştır [30, 31]. Toplam güç radyometre daha iyi bir duyarlılığa ve düşük kayma değerine sahiptir [32, 33]. Bu nedenle, günümüzde metrolojik amaçlı araştırma ve ölçme sistemlerinde de toplam güç radyometre kullanım alanı bulunmaktadır.

Ulusal metroloji enstitüleri gerçekleştirdikleri ölçüm büyüklüklerinin tüm dünyada kabul edilebilirliğini sağlamak için uluslararası alanda ikili veya çoklu karşılaştırma ölçümleri düzenlerler. Bu ölçümler sonucunda ortaya çıkan sonuçlara göre her ülkenin gerçekleştirdiği ölçümlerin güvenilirliği kanıtlanmış olur. Mikrodalga gürültü ölçümleri konusunda da dünyanın önde gelen ülkelerin metroloji enstitülerinin yapmış olduğu karşılaştırma ölçümleri vardır. Bu karşılaştırmaların yayınlanmış sonuçlarına göre Amerika Birleşik Devletleri Metroloji Enstitüsü NIST, her frekans bölgesi için farklı bir toplam güç radyometresi kullanmaktadır. Aynı zamanda İngiltere Metroloji Enstitüsü'nde (NPL) toplam güç radyometre kullanmaktadır. Fransa Metroloji Enstitüsü BNM-LNE, Almanya Metroloji Enstitüsü PTB ve Rusya Metroloji Enstitüsü VNIIFTRI her biri farklı frekans bandında çalışan Dicke tipi radyometreler kullanmaktadır [34–36].

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde, bir radyometrenin çıkışında elde edilen gücün ölçümü için kullanılabilecek güç ölçme yöntemleri ve mikrodalga gücün izlenebilirlik zinciri anlatılmaktadır. İlk aşamada gerçekleştirilecek olan radyometrenin sıcaklığa bağlı duyarlılığını belirlemek için aktif ve pasif sıcaklık kontrolünün radyometre kazancına olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar [37]'de yayınlanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, ortam şartları kontrol altında tutulur ve toplam güç radyometre yeteri kadar büyük bir ısı kütle üzerine kurulur ise aktif



bir sıcaklık kontrolüne ihtiyaç yoktur. Yeterli büyüklükte ısı bir yük üzerine oturtulmuş ve 50 MHz – 26,5 GHz frekans aralığında çalışan oldukça geniş bantlı bir radyometre tasarımı, kurulumu, testi ve belirsizlik hesaplaması ise ikinci bölümde anlatılmıştır.

Radyometre ile ölçülen gürültü gücü, belirli bir bant genişliğine sahip düşük güçlü işaretleri ifade etmektedir. Dolayısı ile gürültü gücünü ölçmek için kullanılan radyometre ile sürekli dalga'ya (CW, continuous wave) sahip düşük güçlü işaretlerin ölçülebileceği fikri doğmuştur. Mikrodalga güç, izlenebilirliği mikrokalorimetre adı verilen güç ölçme sistemleri kullanılarak birincil seviyede güç algılayıcılarının karakterize edilmesi ile elde edilmektedir [38]. Böylece yüksek frekansa sahip güç değerinin dayanak noktası SI (Système International d'Unités, International System of Units, Uluslararası Birimler Sistemi) birimleri olmaktadır.

DC veya düşük frekanslarda ( $< \sim 100$  KHz) genellikle güç yerine gerilim ölçülür. Çünkü DC gerilim oldukça düşük bir belirsizlik ve yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir [39]. Güç ise sistemin varsayılan empedansı üzerinden gerilim kullanılarak hesaplanır. Frekans yükseldikçe empedans değişim oranı artar. Dolayısı ile gerilim yerine güç ölçümü daha çok tercih edilir ve gerilim değeri hesaplanan parametre haline gelir. Özellikle 30 MHz'in üzerindeki frekanslarda küçülen dalga boyu nedeni ile gerilim ölçümü zorlaşmakta olup, güç ölçümü çok daha doğru sonuç vermekte ve kolay ölçülebilmektedir.

Mikrodalga kaynak ilk olarak Sigurd ve Russel Varian kardeşler tarafından 1930'lu yılların sonunda gerçekleştirilmiştir [40]. II. Dünya savaşının hemen öncesinde üretilen mikrodalga kaynaklarının gelişimi savaş sırasında hızla ilerlemiş ve radarlarda kullanılmışlardır. Yüksek frekanslarda güç üreten kaynakların ortaya çıkması ile bu kaynakların ürettiği çıkış güçlerinin bilinmesi gerekmiştir. İlk zamanlar bu gücü ölçecek herhangi bir teknik ve dedektör bulunmazken daha sonraları bazı teknikler geliştirilmeye başlanmıştır. Varian kardeşler tarafından üretilen kaynağın gücünü ölçmek için, klystron kavitesinin duvarına küçük bir delik açılmış ve floresan bir ekran bu deliğin yanına konumlandırılmıştır [41]. Bu teknik ile kavite içerisinde titreşim olup olmadığının yanında, değişik çalışma şartları altında güçteki değişim miktarı izlenebilmiştir. Daha sonraları üretilen güç bir yük

üzerine uygulanarak yükte oluşan sıcaklık değerinin ölçülmesi ile güç ölçülmeye çalışılmıştır. Sonraki yıllarda mikrodalga gücün kullanıldığı uygulama alanları arttıkça bu konuda izlenebilir ölçümler gerçekleştirmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, 1955 yılında Macpherson ve Kerns SI birimlerine izlenebilirliği olan ve doğruluğu %1'den daha düşük olan, miliwatt seviyesinde ölçüm yapan mikrokaloremetreyi tanıtmıştır [42]. Mikrokaloremetre, bolometre tipi (direnci sıcaklık ile değişen bir çeşit algılayıcı) bir güç algılayıcısı kullanmaktadır. Bolometre tipi algılayıcı bir Wheatstone köprüsünün ayağını oluşturmaktadır. Bu bolometrenin bir ucundan mikrodalga güç ve bir ucundan da Wheatstone köprüsü üzerinden DC gerilim uygulanmaktadır. Bolometrenin direnci mikrodalga güç varken ve yokken sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Bolometreye sadece DC güç uygulanırken oluşan direnç değeri mikrodalga güç uygulandığında da sağlanır. Bu durum DC gücün azaltılması ile olmaktadır. Dolayısı ile azaltılan DC güç mikrodalga güç kadar olmaktadır. Bu güç değeri Wheatstone köprüsünden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Diğer yandan bolometre tam olarak DC gücü mikrodalga güce dönüştüremez ve üzerinde sıcaklığa dönüşen kayıplara sebep olur. Bolometre üzerinde oluşan sıcaklık değişimi ısılıçift yardımı ile ölçülmektedir. Wheatstone köprüsünden ve ısılıçiftten elde edilen ölçümlerden yararlanılarak bolometre girişine uygulanan güç değeri hesaplanmaktadır. İlerleyen yıllarda Engen bu mikrokaloremetreyi daha da geliştirerek [43] mikrodalga güç ölçümlerinde ana sistem olarak kullanılmaya başlanmasını sağlamıştır. Günümüze gelene kadar üzerinde bir çok araştırma yapılmıştır ve bu araştırmalar halen devam etmektedir [44-54]. Mikrokaloremetrede 0 dBm – +10 dBm aralığında karakterize edilen güç algılayıcıları standart alınarak güç ölçümleri -70 dBm – +44 dBm aralığında gerçekleştirilmektedir. Mikrodalga frekanslarında -70 dBm'den daha düşük güçleri ölçen spektrum analizör gibi cihazlar olmasına rağmen izlenebilirlik zincirini sağlayamadıklarından metrolojik olarak kabul gören güç ölçme standartları değildirler. Bu durum, neredeyse dünyadaki tüm ülkelerin anlaşma ile kabul ettikleri (sanayisi ve ekonomik gücü gelişmeyen dolayısı ile ülkesi içerisinde uygun organizasyonu oluşturamayan ve çeşitli nedenlerle sistem dışında tutulan ülkeler hariç) Uluslararası Ölçü ve Ayarlar Bürosu (BIPM) web sayfasında yayınlanan verilerden anlaşılmaktadır [55]. Burada yayınlanan verilere göre, mikrodalga alanında uluslararası sisteme entegre – izlenebilir güç ölçüm hizmetini koaksiyel hatlarda verdiğini belirten ve aralarında Rusya, Çin, Almanya,

Fransa, İngiltere, İtalya, Kore ve Türkiye gibi ülkelerin olduğu 22 ülkenin sonuçları incelendiğinde güç ölçümlerinde çoğunlukla -20 dBm ile +10 dBm aralığında beyanatta buldukları anlaşılmaktadır. Az sayıdaki bazı ülkeler bu aralığı -70 dBm'e kadar indirmektedir. Bu ülkeler ölçümde kullandıkları referans cihaz olarak güç algılayıcılarını beyan etmektedirler. Bunun dışında Rusya, 10 MHz – 18 GHz frekans aralığı için -120 dBm – +20 dBm aralığında “power transfer” olarak isimlendirdiği yöntem ile güç ölçtüğünü beyan etmiştir. Ancak bu yönteme ilişkin olarak taranan literatürde yayınlanan herhangi bir kaynağa ulaşamamıştır. Slovenya ise, 2,5 MHz – 1,3 GHz frekans ve -127 dBm – 0 dBm güç aralığında “measuring receiver” yöntemi ile [56, 57], 10 MHz – 18 GHz frekans ve -100 dBm – +20 dBm güç aralığında ise referans zayıflatıcı kullanarak güç ölçtüğünü belirtmiştir [58].

Bu tezin üçüncü bölümünde, düşük seviyeli mikrodalga güç ölçümleri için önerilen ve toplam güç radyometreden yararlanılarak izlenebilirlik zincirini sağlayan ölçme sistemi anlatılmaktadır. Toplam güç radyometresi, güç ölçmek amacı ile değişime uğratılmış ve ara frekans bölgesinde kullanılan bir adım zayıflatıcı ile, SI birimlerine izlenebilirlik sağlanmıştır. Değiştirilen sistemin matematiksel analizi yapılarak hata modeli çıkarılmış ve bu model kullanılarak mikrodalga güç, ölçümlerden hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin hata modelinden yararlanılarak belirsizlik analizi yapılmış ve ölçüm belirsizliği hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, oldukça geniş bir bantta çalışan ve bir yarı iletken gürültü kaynağını hiç çıkarmadan tamamen otomatik olarak ölçümlerini tek seferde yapabilen bir mikrodalga gürültü ölçme sisteminin geliştirilmesi ve bu sistemden yararlanılarak mikrodalga frekanslarında, düşük seviyeli CW işaretin izlenebilir şekilde ölçümlerini gerçekleştirerek belirsizliğinin hesaplanması amaçlanmıştır.

## 1. MİKRODALGA GÜÇ

Uluslararası birim sisteminde güç, birim zamanda harcanan enerji olarak tanımlanmış ve birimi Watt olarak isimlendirilmiştir. Elektronik devre teorilerine göre, herhangi bir yük üzerinde harcanan güç, devreden geçen akımın ve yük üzerindeki gerilimin çarpımıdır [59].

Mikrodalga, güç seviyesi 10 mW'dan aşağıda olduğunda düşük seviyeli güç, 10 mW – 10 W arasında olduğunda orta seviyeli güç ve 10 W'ın üzerinde olduğunda ise yüksek seviyeli güç olarak isimlendirilir. Mikrodalgada güç ölçümü, algılayıcı üzerinde gücün harcanarak algılayıcı çıkışında elde edilen elektriksel işaretin ölçüm devresinde değerlendirilmesiyle gerçekleştirilir. Mikrodalga güç ölçüm sistemlerine ait blok gösterim Şekil 1.1'de verilmiştir [60].



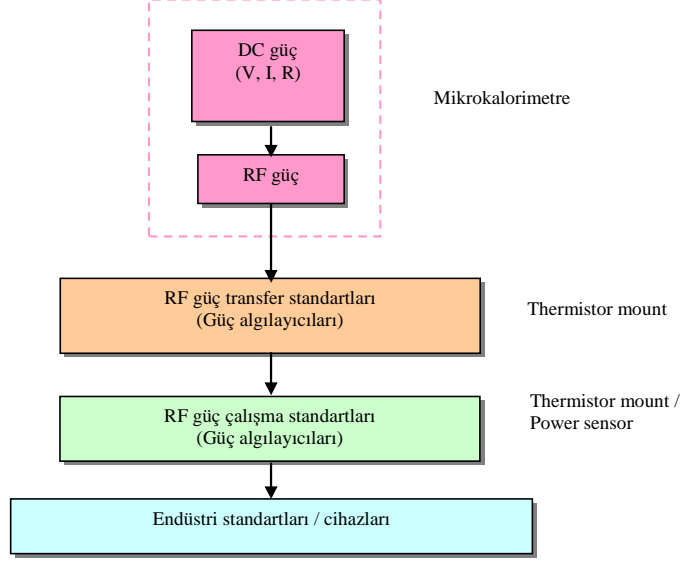
Şekil 1.1. Mikrodalga güç ölçüm sistemi blok şeması

Mikrodalga güç ölçümlerinin doğruluğu, kullanılan ölçme tekniğine bağlıdır. Güç ölçmek için bolometre, diyot, ısıl çift ve kalorimetre olmak üzere dört ayrı teknik kullanılmaktadır. Bolometre tekniği; RF-DC güç transferi veya yerine koyma metodunu, diyot; doğrusal olmayan elemanların kare kuramı tepkisini, ısıl çift; elektriksel gücün ısı etkisinin belirlenmesi metodunu ve kalorimetre ise akışkanların veya katıların termodinamik özellikleri ile RF-DC güç transfer metodunu kullanır.

### 1.1. Mikrodalgada Güç Biriminin Oluşturulması

Mikrodalga frekanslarında güç, DC güçten yararlanılarak belirlenir. DC gücün oluşturduğu sıcaklık değerine eşit sıcaklık oluşturan mikrodalga güç, DC güce eşit

kabul edilir. Mikrodalga gücün belirlenmesinde kullanılan standartların hiyerarşik yapısı (izlenebilirlik zinciri) Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Mikrodalga güc standartlarının izlenebilirlik zinciri

Ulusal metroloji enstitülerinde mikrok calorimetreler kullanılarak DC güc üzerinden mikrodalga güc ölçümü birincil seviyede elde edilmektedir [38, 61-65]. Mikrodalga gücün doğruluğu transfer standartları ve çalışma standartları kullanılarak endüstride yapılan güc ölçümlerine aktarılır. Bu metotta ölçülen güc seviyesi her frekans için 10 mW sabit güc değerine sahiptir.

## 1.2. Mikrok calorimetre

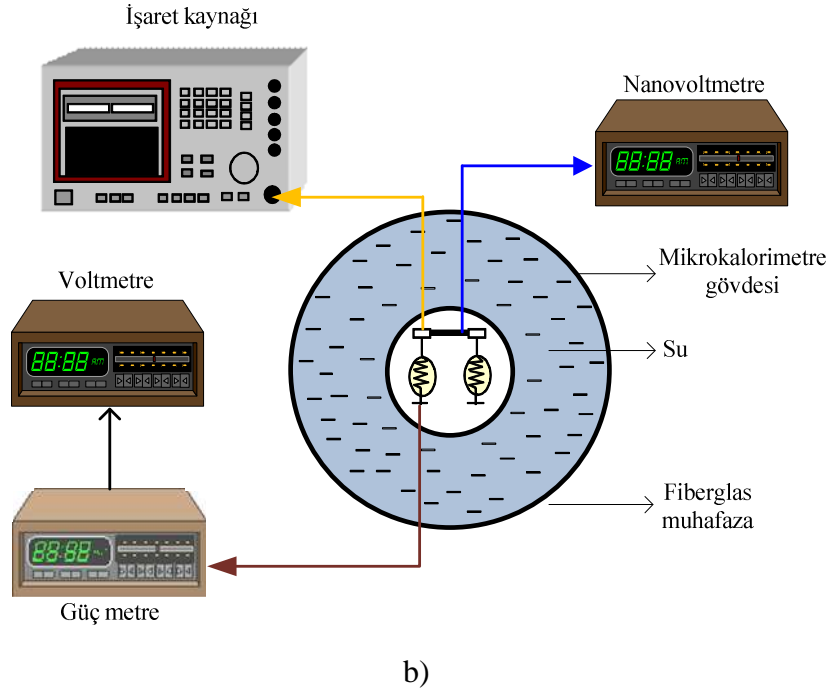
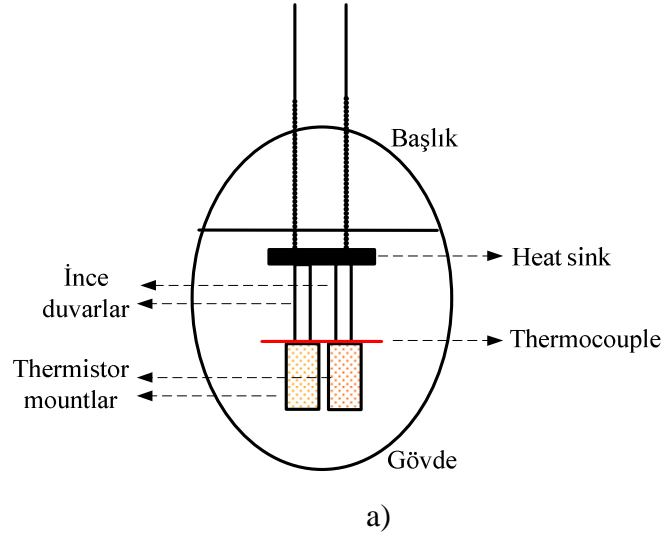
Mikrok calorimetre sisteminin temel elemanı, başlık ve gövde olarak isimlendirilen iki parçadan oluşan paslanmaz çelikten yapılmış bir küttedir [66-67]. Başlık üzerine, karakterizasyonu yapılan thermistor mount, referans thermistor mount ve bu thermistor mountların bağlandığı iki adet ince (duvar) iletim hattı sabit olarak yerleştirilir. Dışarıdan thermistor mountlara güc iletmek üzere kullanılan kablolar bu ince duvarların diğer konnektörüne bağlanır. Kablolar üzerinden olası bir ısı transferinin olumsuz etkilerini en aza indirmek için kablo bağlantı noktasına “heat sink” adı verilen bir kütle bağlanmaktadır. Çalışılan frekans bölgesine bağlı olarak, kullanılan thermistor mountlar ve dolayısı ile konnektör yapısı değişmektedir. Bu durumda thermistor mountların konnektör yapısına göre farklı başlıklar

kullanılabilmektedir. Diğer yandan gövdenin içine hiçbir eleman yerleştirilmez. Bu nedenle gövde her frekans bölgesinde kullanılabilir.

Ölçüm gerçekleştirmek için, thermistor mountlar başlığa simetrik olarak yerleştirilir. Başlık ile gövde kısımları birleştirilir ve çevre şartları sağlanmış bir oda içinde bulunan su banyosunun içine yerleştirilir. Suyun ısı iletkenliğinin çok iyi olmasından dolayı çevre şartlarında oluşan bir değişim başlık ve gövdenin her alanında aynı anda hissedileceğinden bu değişimden kaynaklanabilecek etki en aza indirilmektedir.

Ölçüm sırasında thermistor mountlardan karakterizasyonu yapılanın çıkışındaki gerilim değerleri ölçülür, diğeri ise sıcaklık referansı olarak kullanıldığından çıkışında herhangi bir ölçüm yapılmaz. Sadece özel bir çoklu thermocouple ile her iki thermistor mount arasındaki sıcaklık farkının oluşturduğu mikrovolt veya nanovolt seviyesindeki gerilim değeri ölçülür. Her iki thermistor mount çıkışındaki bağlantı kabloları su banyosunun dışında olduğundan birinci aşamada karakterize edilen thermistor mount ikinci aşamada referans olarak kullanılabilir ve böylece thermistor mountlar su banyosunun içinden çıkarılmadan arka arkaya karakterize edilebilirler.

Mikrokalorimetre kütlesi ve sisteminin bağlantı şeması Şekil 1.3'de verilmiştir. Karakterize edilen thermistor mounta ait çıkışlar, Wheatstone köprüsü içeren bir güçmetreye bağlanır. İşaret kaynağından thermistor mountun girişine RF işareti uygulanmadan önce ve sonra köprüyü dengede tutan DC güç kaynağının çıkışındaki gerilim bir multimetre ile ölçülür. Referans olarak kullanılan thermistor mount ile ölçüm alınmadığından çıkışlarının bir güç metreye bağlanması gerekmez. Thermocouple çıkışı ise bir nanovoltmetre ile ölçülür. Ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak karakterize edilen thermistor mounta (güç algılayıcısı) ait düzeltme katsayısı (etkin verimlilik,  $\eta$ ) Eşitlik (1.1) - Eşitlik (1.3)'deki gibi hesaplanır.



Şekil 1.3. a) Mikrokalorimetre kütlesi ve b) mikrokalorimetre sistemi

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_1}{P_1 - P'} \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_1}} \quad (1.1)$$

$$P_1 = \frac{V_1^2}{R} \quad (1.2)$$

$$P' = \frac{V_2^2}{R} \quad (1.3)$$

Burada,  $V_{1,2}$ , RF işareti uygulanmadan önce ve sonra thermistor mount çıkışında ölçülen köprü gerilim değerleri,  $R$ , thermistor mount direnç değeri,  $\Delta\theta_{1,2}$ , RF işareti uygulanmadan önce ve sonra thermocouple çıkışındaki gerilim değerleridir.

### 1.3. Güç Algılayıcıları

Mikrodalga güç ölçümlerinin yapılabilmesi için çeşitli algılayıcılar kullanılır. Bu algılayıcıların önemli özellikleri, duyarlılık (sensitivity), gürültü seviyesi (noise figure) ve tepki süresidir. Bir algılayıcının duyarlılığı, özellikle düşük seviyeli ölçümlerde önemlidir ve bu duyarlılık, algılayıcının hissedebildiği en küçük işaret seviyesi olarak ifade edilir. Ancak algılayıcının içerisinde bir gürültü varsa, gürültü seviyesinin altında kalan işaretler ölçülemez. Bu nedenle, iyi bir algılayıcı düşük gürültü seviyesine sahip olmalıdır.

Mikrodalga işareti uygulandığında farklı algılayıcılar farklı tepki gösterirler. Uygulamalarda kullanılan algılayıcıların tepkisi, doğrusal veya kare kuramı olmak üzere iki tiptedir. Doğrusal tepkiye sahip bir algılayıcının çıkışındaki işaret, girişindeki güç ile doğru olarak bağıntılıdır. Kare kuramı tepkiye sahip bir algılayıcının çıkışı ise girişinin karesidir. Kare kuramı algılayıcılar, “true power sensor” olarak da isimlendirilir. Bazı algılayıcılar hem doğrusal hem de kare kuramı tepkiye sahiptir. Doğrusal bölüm yüksek, kare kuramı bölümü ise düşük seviyedeki güçlerin ölçümünde kullanılır [68]. Temel güç algılayıcıları, a) bolometre, b) ısı çift ve c) diyot olarak sıralanabilirler.

#### 1.3.1. Bolometre Tipi Algılayıcı

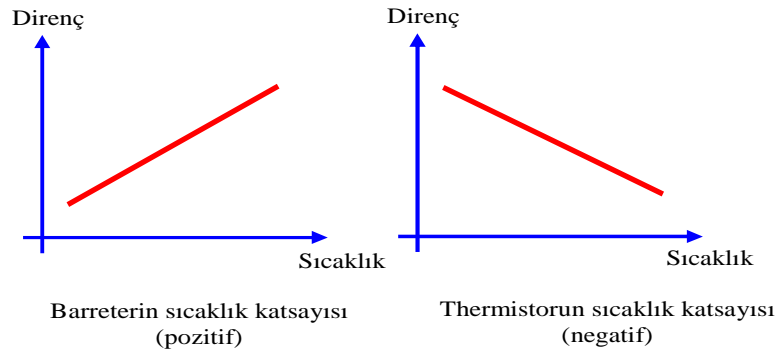
Bolometre, değeri sıcaklık ile değişen bir çeşit dirençtir. Uygulanan mikrodalga gücün ısı etkisi nedeniyle değeri değişir. Duyarlılığı tipik olarak  $5 \Omega/\text{mW} - 50 \Omega/\text{mW}$ 'tır. Bolometrelerin, barretter ve thermistor olmak üzere iki tipi vardır.

Barretter, platinyumdan yapılmış çok ince bir tel dirençtir ve pozitif sıcaklık katsayısına sahiptir (Şekil 1.4). Uygulanan en yüksek değerdeki mikrodalga güç,



barretterin yanma (kopma) değerini aşmamalıdır. Barretterler en basit, en hassas ve en ucuz algılayıcılardır. Ancak yansıma kayıplarına neden oldukları için mikrodalga güç ölçümü için uygun değildirler.

Thermistor, yarıiletken bir elemandır ve negatif sıcaklık katsayısına sahip (Şekil 1.4) bir direnç özelliği gösterir. Birbirine çok yakın, paralel iki tel arasındaki boşluğa yerleştirilen bu elemanlar hem koaksiyel hem de dalga kılavuzu yapısında kurulan sistemlerde kullanılabilir. Bolometre tipi algılayıcılar çoğunlukla -20 dBm ile +10 dBm aralığındaki güç ölçümlerinde kullanılırlar.



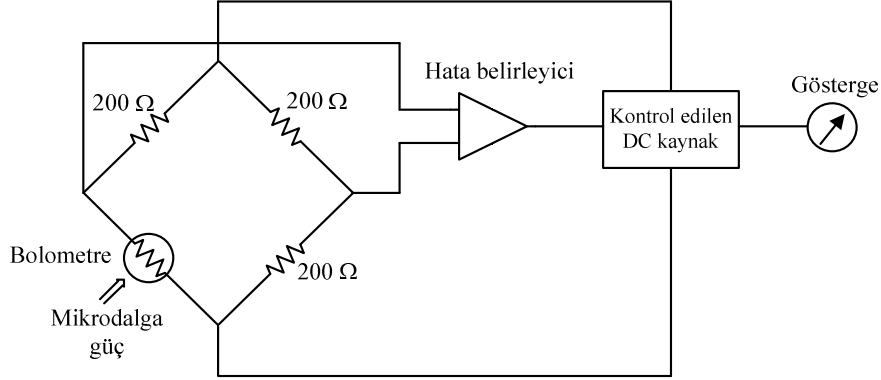
Şekil 1.4. Barreter ve thermistorun sıcaklık katsayıları

### 1.3.1.1. Bolometre ile güç ölçüm sistemi

Bu ölçüm sisteminde bir Wheatstone köprüsü kullanılır. Köprünün bir koluna bolometre bağlanır. Bolometreye mikrodalga işaret uygulanmadan önce köprü DC veya düşük frekanslı (AF) bir işaret ile dengeye getirilir. Daha sonra mikrodalga işaret uygulanır. Bolometre üzerinde harcanan mikrodalga işaret ısı enerjisinin açığa çıkmasını sağlar. Bu ısı enerjisinin sebep olduğu sıcaklık nedeniyle bolometrenin direnci değişir ve bu direnç değişimi de köprünün dengesinin bozulmasına neden olur. Köprünün tekrar dengeye getirilebilmesi için daha önce belirli bir değere ayarlanan DC veya AF işareti azaltılır veya arttırılır. DC veya AF işaretin değişiminden elde edilen güç farkı bolometreye uygulanan mikrodalga güce eşittir. Fark gücü göstergeden mikrodalga güç olarak okunur. Bu metot, dengeli köprü metodu olarak da isimlendirilir.

### 1.3.1.2. Otomatik köprü metodu

Şekil 1.5’de verilen otomatik köprü ölçüm sisteminde, bolometre köprüsünü dengeye getirmek amacıyla DC veya AF yükselteç içeren bir geri besleme döngüsü kullanılmaktadır. Temelde otomatik köprü devresi, köprü devresi ile benzerdir. Köprüyü dengeye getirmek amacıyla DC veya AF güç kullanılır. Dengedeki köprüye mikrodalga güç uygulandığında, köprü dengesini yitirir ve bir hata işareti üretilerek yükselteçte yükseltilir. Yükseltelen bu işaret köprüyü dengeye getirmek amacıyla kaynağa uygulanır. Bunun sonucunda hata işaretine uygun olarak kaynağın çıkışındaki DC veya AF güçte değişim olur ve bu değişim ile köprü dengeye getirilir. Bu değişim bolometreye uygulanan mikrodalga güç ile orantılıdır. Köprünün otomatik olarak dengelenmesi nedeniyle bolometre direncinin devamlı sabit kalması sağlanır. Yani bolometreye bütün güç kaynaklarınca uygulanan toplam güç sabit kalır. Örneğin mikrodalga güç uygulanmadığında köprü 10 mW DC güç ile dengedeysen, bolometreye 4 mW mikrodalga güç uygulanırsa bolometre üzerindeki toplam güç 6 mW DC güç ve 4 mW mikrodalga güç olur.

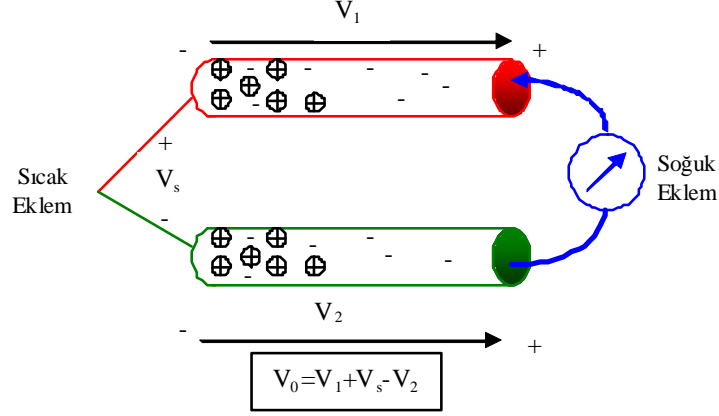


Şekil 1.5. Otomatik köprü ile güç ölçüm sistemi

### 1.3.2. Isıl çift tipi algılayıcı

Isıl çiftler, iki farklı metalin bir noktada birleştirilmesi ile oluşturulurlar. Isıl çiftin birleşim noktaları sıcak nokta, diğer uçları ise soğuk nokta olarak isimlendirilir ve soğuk uçlar bir ölçüm sistemine bağlanır (Şekil 1.6). Metallerin sıcak ve soğuk uçları arasında ısı farkı oluştuğunda, bir elektromotor kuvvet üretilir. Soğuk noktaların karşısına bir yük bağlandığında, iki nokta arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı olarak

üretileen elektromotor kuvvetin değeri gerilim olarak okunur. Bu ısıı elektromotor kuvvetin büyüklüğü, sıcaklık farkına ve metallerin özelliklerine bağıdır.

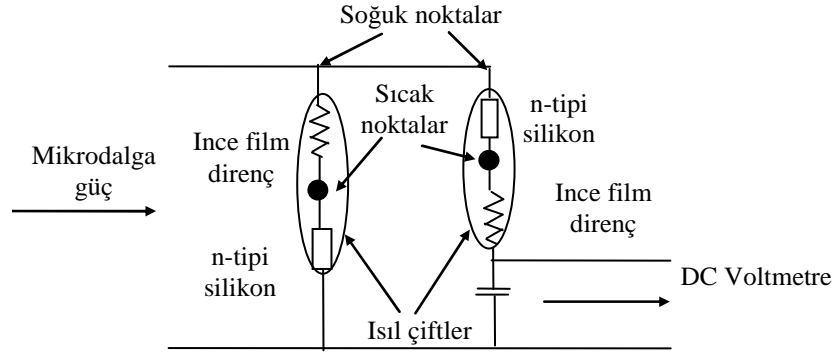


Şekil 1.6. Isıl çift prensip şeması

Isıl çift algılayıcılarda sıcak nokta, ince film dirençle yarı iletkenin bağlandığı noktadır. İnce film direnç mikrodalga gücü ısıya çevirir ve soğuk nokta ile sıcak nokta arasında sıcaklık farkına sebep olur. Isıl çift algılayıcılar, termistorlere göre daha büyük dinamik ölçüm alanına sahip olup -30 dBm'e kadar ölçüm yapabilirler.

### 1.3.2.1. Isıl çift ile güç ölçüm sistemi

Güç ölçüm devresine bir mikrodalga gücü uygulandığında, ısıı çift bir gerilim üretir. Girişe uygulanan mikrodalga güç ile orantılı olan bu gerilim değeri milivoltmetre üzerinden Watt olarak okunur. Bu sistemin bir çok dezavantajları vardır. Bunlardan biri, ısıı çift çapının büyüklüğüdür. Isıl çiftin çapı, deri etkisini azaltmak amacıyla küçük olmalıdır. Ancak çap çok küçük olduğunda ısıı çift yüksek akım nedeniyle kopabilir. Yeni üretilen sistemlerde ince film teknikleri kullanılarak söz konusu dezavantajlar aşılmıştır. Bir silikon çipin üzerine yerleştirilen ince film mikrodalga gücünü ısıya çevirir ve çipin merkezinin dış uçlardan daha sıcak olmasına neden olur. Uygulamada kullanılan ve Şekil 1.7'de şeması verilen ısıı çift devresinde iki adet ısıı çift kullanılmıştır [69]. Her birinin direnci 100  $\Omega$  olup DC gerilim için seri, mikrodalga için paralel bağlıdır. Dolayısıyla mikrodalga iletim hattına karşılık gösterdiği direnç değeri 50  $\Omega$ 'dur.



Şekil 1.7. Isıl çift güç ölçüm devresi

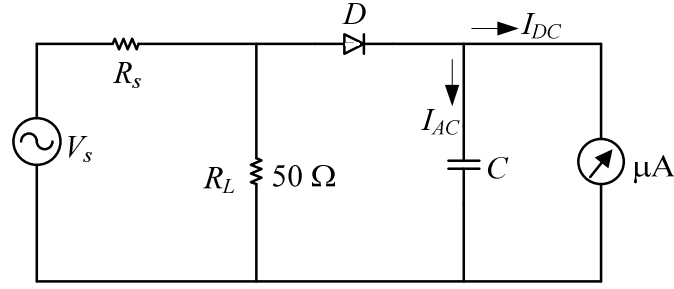
Bu algılayıcıların çıkışı bolometre devresindeki gibi geri besleme ile kontrol edilemez. Bu nedenle bu algılayıcılar genellikle 1 mW, 50 MHz değerindeki referans güç ile kontrol edilmelidir.

### 1.3.3. Diyot tipi algılayıcı

Diyot algılayıcılar, -70 dBm (100 pW)'e kadar düşük seviyedeki güç ölçümlerinde kullanılır. Yüksek frekanslardaki bir mikrodalga işaret doğrultularak DC işarete çevrilir ve DC güç ölçülür. Diyot algılayıcıların en büyük avantajı, mikrodalga gücünü DC güce çevirme işlemindeki verimliliğidir. Diyot algılayıcının kare kuramı karakteristiği kullanıldığında düşük seviyelerdeki mikrodalga güç başarıyla DC güce çevrilir.

#### 1.3.3.1. Diyot ile güç ölçüm sistemi

Bu ölçüm sisteminde mikrodalga güç, yarı iletken bir diyot ile DC güce çevrilir ve bu değer mikro ampermetre ile okunur. Şekil 1.8'de verilen diyot güç ölçüm devresinin girişine uygulanan mikrodalga güç, yük direnci  $R_L$  (50  $\Omega$ ) üzerinde harcanır. Bu durumda oluşan gerilim diyot tarafından doğrultulur ve AC bileşeni kapasitör üzerinden toprağa verilir, DC bileşeni ise ampermetre üzerinden Watt olarak okunur.



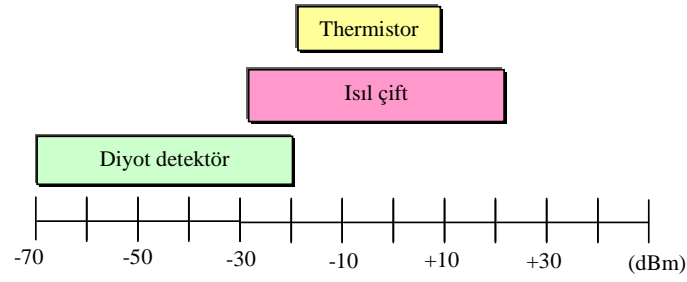
Şekil 1.8. Diyot ile güç ölçüm devresi

#### 1.4. Güç Algılayıcılarının Karşılaştırılması

Her üç algılayıcı tipinin, birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bu avantajlar ve dezavantajlar, maliyet, tepki hızı, güç ölçüm alanı, aşırı yüklenmeye karşı dayanıklılığı, frekans alanı, yansıma katsayısı ve bunun gibi faktörlerin karşılaştırılması ile belirlenmektedir.

Düşük seviyelerdeki gücü ölçmek için, güç metrelerde dar bant genişliğine sahip filtreler kullanılır. Böylece istenen işaret seçilebilir ve gürültü azaltılır. Ancak dar bant genişliği, tepki süresini uzatır. Sıcaklık dönüşüm prensibinin kullanıldığı termistor ve ısı çiftlerinin de tepki süreleri uzundur. Çünkü algılayıcıların ısınma ve soğuma zaman katsayıları tepki süresinin uzamasına neden olur. En düşük ölçüm alanı, en uzun tepki süresine sahiptir.

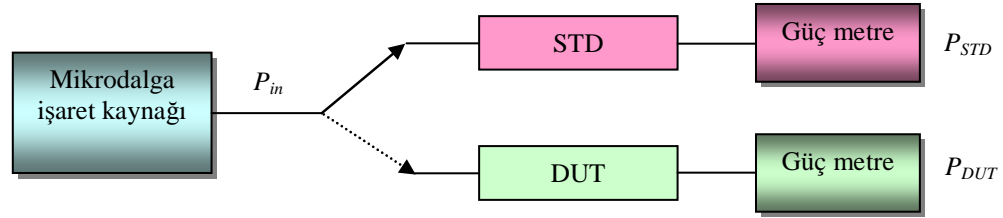
Thermistorlerin doğrulukları diğer güç algılayıcılarına göre çok daha iyidir. Ancak, güç çalışma aralığı ısı çift ve diyot algılayıcılara göre daha dardır. Thermistorler genellikle -20 dBm ile +10 dBm arasındaki ölçümlerde kullanılır. Isıl çiftlerin çalışma aralığı daha geniş olup -30 dBm ile +20 dBm arasındaki ölçümlerde kullanılır. Bu çalışma alanı, zayıflatıcı kullanılarak +44 dBm'e kadar genişletilebilir. Diyot algılayıcılar ise en iyi duyarlılığa sahip algılayıcılardır ve -70 dBm ile -20 dBm arasında bir çalışma alanına sahiptirler. Algılayıcıların yansıma katsayıları, empedans uyumsuzluğunu ifade ettiğinden çok önemli bir faktördür. Isıl çift ve diyot algılayıcıların yansıma katsayıları termistorlerden daha iyidir. Şekil 1.9'da örnek olarak güç algılayıcılarının kullanıldıkları güç seviyeleri gösterilmiştir [70].



Şekil 1.9. Değişik tip güç algılayıcılarına göre güç seviyeleri

### 1.5. Güç Algılayıcılarının Karakterizasyonu

Bir güç algılayıcısının ikincil seviyede karakterizasyonu, kalibrasyon faktörü parametresinin belirlenmesi ile gerçekleştirilir. Kalibrasyon faktörü, standart kabul edilen ve kalibrasyon faktörü bilinen bir algılayıcı ile karşılaştırma yapılarak belirlenir [71-74]. Böyle bir ölçümde kullanılan düzeneğe ait blok gösterim Şekil 1.10'da verilmiştir. Söz konusu şekilde standart güç algılayıcı "STD" ile, kalibrasyon faktörü belirlenmek istenen algılayıcı "DUT" olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Kalibrasyon faktörü ölçümü

Kalibrasyon faktörü frekans ile değişmektedir. Bu nedenle her frekansta değeri belirlenmelidir. Ölçüm işlemine başlamadan önce mikrodalga işaret kaynağı istenen frekansa ayarlanır. Hem STD hem de DUT'nin bağlandığı güç metrede kalibrasyon faktörü fonksiyonu, frekans ne olursa olsun % 100 değerine ayarlanır. Daha sonra mikrodalga işaret kaynağı çıkışı, ilk önce STD'ye bağlanarak güç uygulanır ve sonuç güç metre göstergesinden okunur. Bir frekans için yapılan bu ölçüm işleminde rastgele hataları en aza indirmek için STD, işaret kaynağından çıkarılmadan aynı frekans için birden fazla ölçüm yapılır.

STD, mikrodalga işaret kaynağından çıkarılarak yerine DUT takılır. STD'ye uygulanan aynı frekans ve aynı seviyedeki güç DUT'ye uygulanır ve sonuç güçmetre göstergesinden okunur.

Mikrodalga ölçümlerinde bağlantılar, güç seviyesinde kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıplar, mevcut hata kaynakları içerisinde en etkin olanıdır. Bu nedenle bağlantılar her konnektör yapısı için özel olarak belirlenmiş belirli bir tork ile sıkılmalıdır. Bu amaçla bağlantılar tork anahtarlar ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca kullanılan konnektörlerin yapılarındaki simetri bozukluğundan kaynaklı oluşabilecek kayıpların da örneklenebilmesi amacıyla algılayıcılar kaynak çıkışından çıkarılarak başka bir konumda tekrar bağlanır. Her algılayıcı için üç farklı konumda bağlantı yapılır. STD ve DUT'nin kalibrasyon faktörleri (sırasıyla  $KF_{STD}$  ve  $KF_{DUT}$ ) ile ölçülen  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  güç değerleri arasındaki ilişki Eşitlik (1.4)'deki gibidir.

$$KF_{STD} = \frac{P_{STD}}{P_{in}}, \quad KF_{DUT} = \frac{P_{DUT}}{P_{in}} \quad (1.4)$$

Her iki algılayıcıya uygulanan  $P_{in}$  gücü aynı değere sahiptir. Bu durumda,

$$\frac{P_{STD}}{KF_{STD}} = \frac{P_{DUT}}{KF_{DUT}} \quad (1.5)$$

elde edilir.  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  güç değerleri, güç metre göstergelerinden ölçülen değerlerdir.  $KF_{STD}$  ise STD'nin kalibrasyon sertifikasından alınır. Böylece, Eşitlik (1.5)'de bilinmeyen sadece  $KF_{DUT}$ 'dir. DUT'nin bilinmeyen kalibrasyon faktörü, Eşitlik (1.6)'daki bağıntı kullanılarak hesaplanır.

$$KF_{DUT} = KF_{STD} \frac{P_{DUT}}{P_{STD}} \quad (1.6)$$

## 2. TOPLAM GÜÇ RADYOMETRE

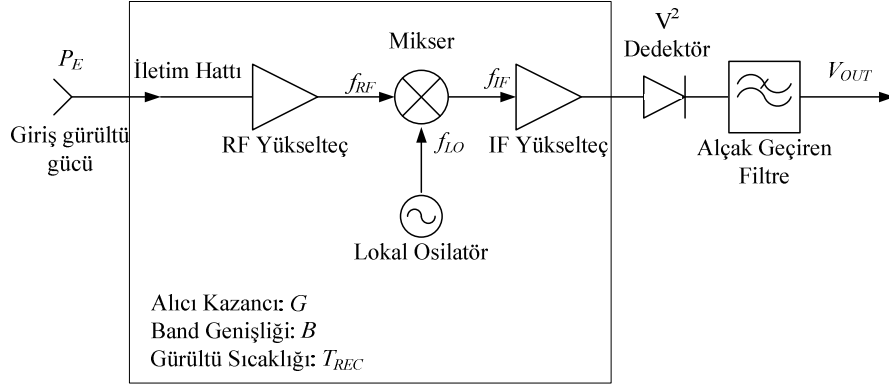
Düşük genlik seviyesine sahip gürültü işaretini ölçmeye yarayan sistemlere genel olarak radyometre denir [6]. Radyometre, ısıl veya diğer nedenler ile oluşan gürültü işaretinin ölçümünde kullanılan ve oldukça düşük seviyelerdeki işaretleri algılayabilen bir çeşit süperheterodin alıcıdır [75, 76].

Gürültü ölçmek amacıyla sıklıkla kullanılan iki tip radyometre vardır. Bunlar, temel yapı olarak birbirlerine çok benzeyen toplam güç radyometre (total power radiometer) ve Dicke veya anahtarlamalı radyometredir. Metrolojide, mikrodalga gürültüsünü ölçmek amacıyla ilk başlarda Dicke radyometre kullanılmıştır [20, 77]. Dicke radyometresinde anahtarlama sistemi ile kazanç sürekli kontrol edilir. Günümüzde, mikrodalga gürültü ölçümlerinde Dicke radyometrenin kullanımı yerine toplam güç radyometre tercih edilmektedir [22]. Şekil 2.1’de blok gösterimi verilen toplam güç radyometresi, Dicke radyometresinde yer alan anahtarlama sistemi çıkarılarak elde edilmiştir.

Geniş bantlı giriş gürültü gücü, toplam kazancı  $G$  ve bant genişliği  $B$  olan radyometrenin girişine uygulanır. Radyometre giriş kısmında bulunan RF yükselteç, girişine uygulanan işareti, filtreler ve yükseltir. Filtrelenen ve yükseltelen işaret, ilgilenilen RF frekans bölgesindeki  $f_{RF}$  frekansına ve  $B_{RF}$  bant genişliğine sahiptir.

RF frekans bölgesinde yer alan  $B_{RF}$  bant genişliğindeki işaret, mikser tarafından IF frekans bölgesinde  $B$  bant genişliğine sahip olacak şekilde dönüştürülürken IF yükselteç ile biraz daha yükseltir. Uygulamada, RF yükselteç genellikle IF yükselteçten daha geniş bir banda sahiptir. Bu nedenle, IF yükseltecin bant geçirme karakteristiğinden yararlanılarak radyometre bant genişliği hesaplamaları yapılır. Ara frekansa indirgenen, filtrelenen ve yükseltelen gürültü işareti dedektör girişine uygulanır ve bu işaretin gerilim değerinin karesi alınır. Dedektör çıkışındaki işaret bir alçak geçiren filtreye uygulanır.





Şekil 2.1. Toplam güç radyometre blok gösterimi

RF frekansından IF frekansına dönüşümde eğer işaretin tek yan bantı aktarılsa bu durumda alıcı, tek yan bantlı alıcı (single side band receiver) olarak isimlendirilir. RF yükselteç kullanılmadığında veya oldukça yüksek bant genişliğine sahip olan bir RF yükselteç kullanıldığında, IF işareti  $f_1$  ve  $f_2$  merkez frekanslarına sahip iki yan bantı içerecektir. Bu frekanslar,

$$\begin{aligned} f_1 &= f_{LO} - f_{IF} \\ f_2 &= f_{LO} + f_{IF} \end{aligned} \quad (2.1)$$

şeklinde olur. Bu durumda çift yan bant radyometre giriş gücü,  $f_1$  ve  $f_2$  frekanslarındaki işaretler nedeni ile radyometre çıkışında, tek yan bant alıcı giriş gücünün iki katı olur. Burada girişe uygulanan,  $f_1$  ve  $f_2$  frekanslarına sahip işaretlerin gürültü güçlerinin spektrum boyunca eşit olduğu varsayılır.

Girişteki gürültü kaynağının etkin gürültü sıcaklığı  $T_E$ , Eşitlik (2.2) kullanılarak gürültü kaynağının gürültü gücü hesaplanır.

$$P_E = kT_E B \quad (2.2)$$

k: Boltzmann sabiti, ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K).

Aynı şekilde, radyometre etkin gürültü sıcaklığı  $T_{REC}$ , Eşitlik (2.3) kullanılarak radyometrenin ürettiği gürültü gücü belirlenir.

$$P_{REC} = kT_{REC} B \quad (2.3)$$

Sistemin toplam giriş gürültü sıcaklığı ( $T_{SYS}$ ), gürültü kaynağının ve radyometrenin etkin gürültü sıcaklığının toplamı şeklinde olur.

$$T_{SYS} = T_E + T_{REC} \quad (2.4)$$

Buradan,

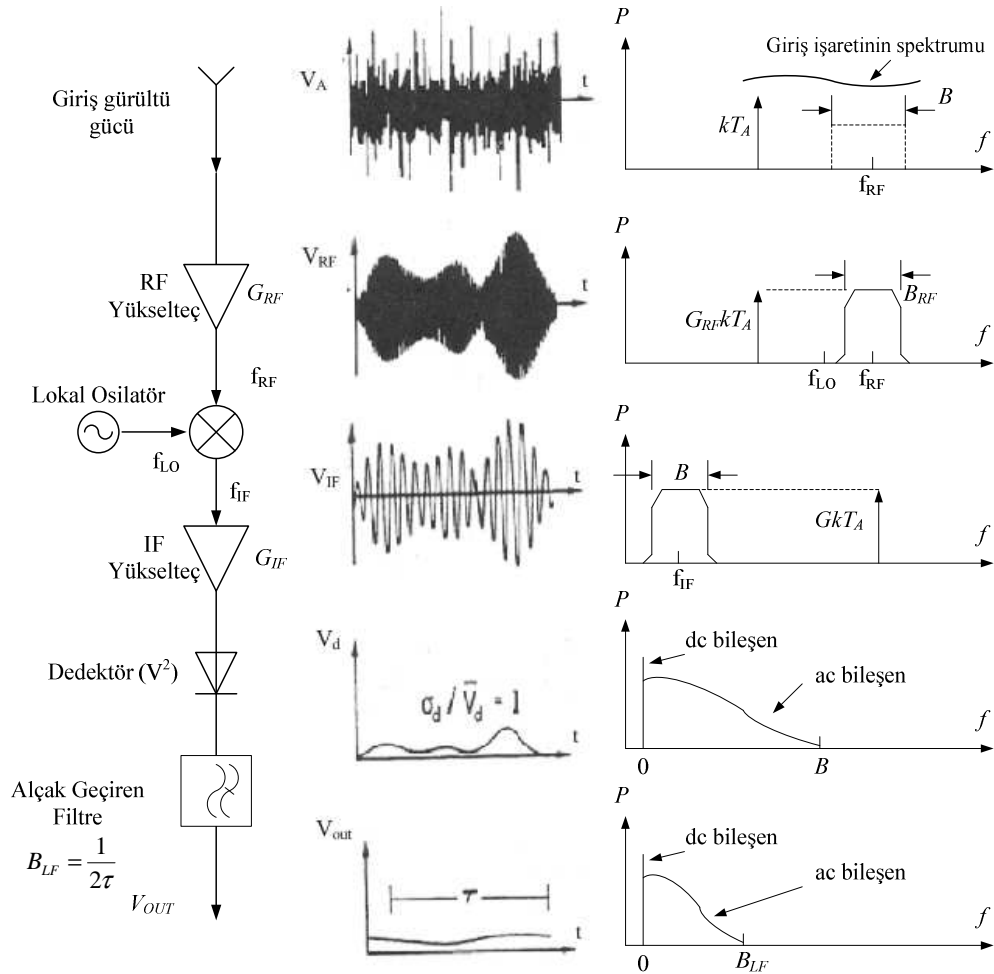
Şekil 2.2'deki IF yükselteç çıkışındaki  $P_{IF}$  gücü,

$$P_{IF} = GkT_{SYS}B \quad (2.5)$$

olarak elde edilir.

Bir süperheterodin alıcı sistemi olan toplam güç radyometresindeki işaret akışı

Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Toplam güç radyometresindeki işaret akışı

Duyarlılık, ölçme cihazı girişindeki değişimin buna karşılık gelen çıkıştaki değişime oranı olarak tanımlanmaktadır [78]. Toplam güç radyometrenin duyarlılığı  $\Delta T_{sys}$ ,  $T_{sys}$ 'in en küçük değişimlerini göstermekte ve çıkış geriliminin AC bileşenine eşit olan standart sapma ile ifade edilmektedir.  $\Delta T$  radyometre girişinde gözlenebilecek veya ayırt edilebilecek olan en küçük gürültü sıcaklığı olmak üzere, Eşitlik (2.6), kazancında herhangi bir değişim olmayan ideal bir toplam güç radyometresinin duyarlılığını veya çözünürlüğünü tanımlar [4, 5].

$$\Delta T \equiv \Delta T_{SYS} = \frac{T_{SYS}}{\sqrt{B\tau}} \quad (2.6)$$

$\tau$ : Filtrenin zaman sabiti (s).

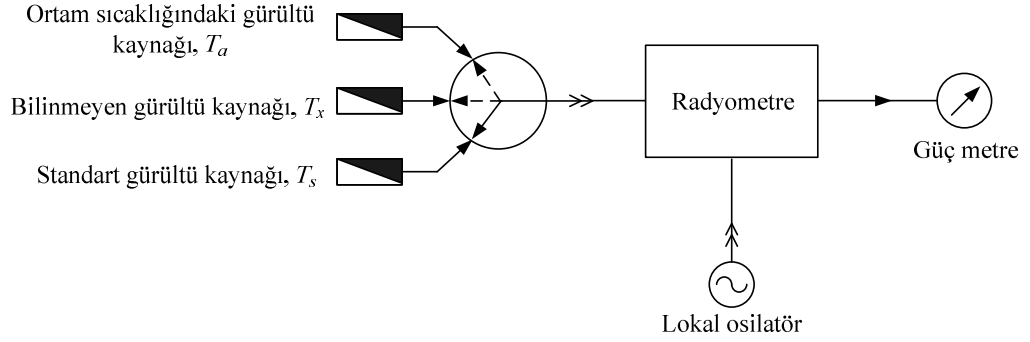
$\Delta T$  'deki değişim, girişteki gürültü sıcaklığı değişimini ifade etmektedir. Oysa  $T_{sys}$  hem giriş gürültü sıcaklığını hemde sistemin gürültü sıcaklığını içermektedir. Eğer radyometreden kaynaklanan bir gürültü sıcaklığı değişimi var ise bu değişimin sonuca etkisi belirlenemez.

Toplam güç radyometre kullanılarak bilinmeyen bir gürültü kaynağının ürettiği gürültü değerini belirlemek için Şekil 2.3'de blok gösterimi verilen sistem kullanılmaktadır. Bu sistemde, radyometre girişine ortam sıcaklığındaki gürültü kaynağı ( $T_a$ ), standart gürültü kaynağı ( $T_s$ ) ve bilinmeyen gürültü kaynağı ( $T_x$ ) bağlanır. Toplam güç radyometre çıkışındaki güç, Eşitlik (2.2) göz önünde bulundurulduğunda ortam sıcaklığındaki yük için  $P_a$ , standart gürültü kaynağı için  $P_s$  ve ölçülecek olan gürültü kaynağı için  $P_x$  olur. Radyometre çıkışında ölçülen bu güçlerden yararlanarak bilinmeyen gürültü kaynağına ait gürültü sıcaklığı  $T_x$ , Eşitlik (2.7) ile hesaplanır [79],

$$T_x = T_a + (T_s - T_a) \frac{(Y_x - 1)M_s \eta_s}{(Y_s - 1)M_x \eta_x}. \quad (2.7)$$

Burada,  $T_a$  ortam gürültü sıcaklığı (K),  $T_s$  standart gürültü sıcaklığı (K),  $Y_x$  bilinmeyen ve ortam gürültü kaynakları radyometre girişine bağlı iken radyometre çıkış güçlerinin oranı (bilinmeyen Y-katsayısı),  $Y_s$  standart ve ortam gürültü kaynakları radyometre girişine bağlı iken radyometre çıkış güçlerinin oranı (standart

Y-katsayısı),  $M_x$  bilinmeyen gürültü kaynağı çıkışı ile radyometre girişi arasındaki empedans uyumsuzluğu katsayısı,  $M_s$  standart gürültü kaynağı çıkışı ile radyometre girişi arasındaki empedans uyumsuzluğu katsayısı,  $\eta_x$  ve  $\eta_s$  sırasıyla, bilinmeyen ve standart gürültü kaynaklarının bağlandığı mikrodalga anahtar yoluna ait etkin verimliliklerdir.

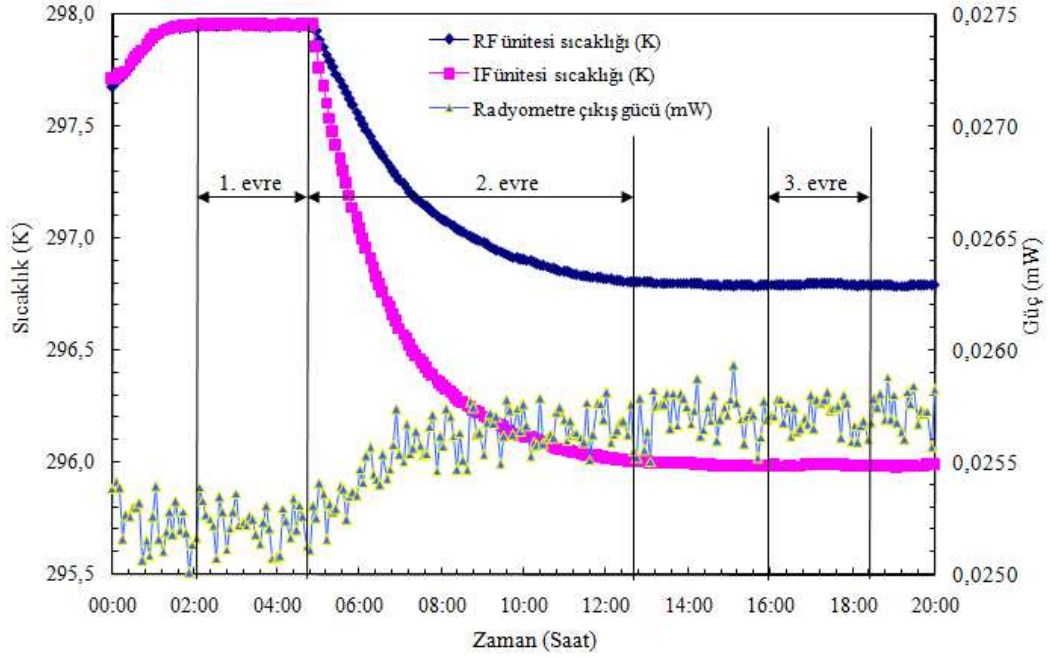


Şekil 2.3. Toplam güç radyometresi ile gürültü ölçme

Eşitlik (2.7)'nin geçerli olabilmesi için, bu ölçümler süresince radyometre kazancının değişmemesi gerekir. Gerekli önlemlerin alınmaması durumunda radyometrenin kazancı değişebileceği gibi çıkışında kayma da (drift) olabilmektedir [32]. Metrolojik olmayan uygulamalarda radyometre kazancının değişmesine neden olan sıcaklık parametresi, sıcaklık düzeltmesi yöntemi ile ölçüm sonuçlarından ayrılabilir [80]. Ancak metrolojik amaçlı kullanımda sıcaklık düzeltmesi fazladan bir bileşen olacağı için belirsizlik parametresine istenmeyen bir katkı getirecektir [81]. Bu nedenle, bu çalışmada sıcaklık düzeltmesi yerine, radyometre çıkışı üzerinde etkin olmayan bir sıcaklık değişimi aralığında çalışılmıştır [37]. Çalışmaların gerçekleştirildiği laboratuvarın ortam sıcaklığı  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak ayarlanmış ve sürekli izlenmiştir. Bu ortam şartlarında yapılan ölçümlerin radyometre çıkış gücü üzerindeki etkisini araştırmak için 12 GHz – 18 GHz frekans aralığında çalışan ve sıcaklığı kontrol edilebilen bir test radyometre ile sıcaklık kontrolünde kullanılmak üzere bir su banyosu kurulmuştur. Sıcaklığı kontrol edilen su banyosu içerisindeki suyun sıcaklığı  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur.

Su, 12 GHz – 18 GHz frekans aralığında çalışan test radyometresinin üzerine yerleştirildiği büyük bakır bloklar içerisinde dolaştırılarak radyometre sıcaklığı sabit tutulmuş ve radyometre sıcaklığı ile çıkış gücü ölçülmüştür (1. evre). Daha sonra,

sıcaklık kontrolü devre dışı bırakılmış ve yine radyometre sıcaklığı ve çıkış gücü ölçülmüştür (2. ve 3. evre). Bu ölçümler sonucu elde edilen RF ünitesi, IF ünitesi sıcaklıkları ve radyometre çıkış gücü Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Sıcaklık değişimine karşılık radyometre davranışı

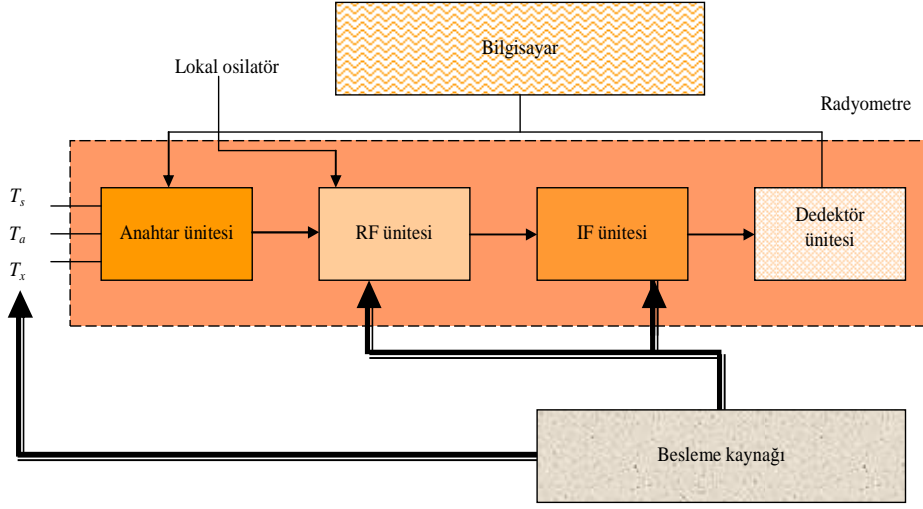
Test radyometresi girişinde sabit bir gürültü kaynağı bağlı iken radyometre çıkış gücü ölçülmüştür. Bu sırada radyometrenin aktif sıcaklık kontrolünü gerçekleştirmek için sıcaklığı kontrol edilen su sisteme verilmiştir. Su verildikten sonra sistemin sıcaklık dengesinin olduğu kısım 1. evre olarak isimlendirilmiştir. Birinci evre 2 ½ saat olarak alınmış ve bu evrede RF ünitesinin standart sapması 0,0034 K ve IF ünitesinin standart sapması 0,0031 K olarak hesaplanmıştır. Aynı zaman diliminde çıkış gücünün standart sapması ise  $8,73 \times 10^{-5}$  mW olarak elde edilmiştir. Daha sonra sisteme verilen sıcaklık kontrollü su kesilerek sistemin aktif sıcaklık kontrolü devre dışı bırakılmış ve sistemin laboratuvar ortam şartları civarlarında dengeye gelmesi hedeflenmiştir. Yaklaşık olarak ortam sıcaklığı bölgesine oturduğu kısım kadar geçen süre 2. evre olarak isimlendirilmiştir. Bu evrede ölçülen RF ünitesi sıcaklığı ile radyometre çıkış gücü arasındaki ilişki bir grafik oluşturacak şekilde çizilmiş ve bir fit uygulanmıştır. Elde edilen ifadeden  $\partial P / \partial T_{RF}$  değeri yani, radyometre çıkış gücünün RF ünitesi sıcaklığına olan bağımlılığı -0,00036 mW/K olarak

hesaplanmıştır. Aynı işlem IF ünitesi ile çıkış gücü için oluşturulan grafiğe uygulanmıştır.  $\partial P/\partial T_{IF}$  değeri  $-0,00024$  mW/K olarak hesaplanmıştır. Aktif sıcaklık kontrolünün olmadığı kısımda radyometre sıcaklığının tam olarak dengede olduğu 2 ½ saatlik bölge 3. evre olarak isimlendirilmiştir. Bu evrede RF ünitesinin standart sapması  $0,0035$  K ve IF ünitesinin standart sapması  $0,0032$  K olarak hesaplanmıştır. Çıkış gücünün standart sapması ise  $6,77 \times 10^{-5}$  mW olarak elde edilmiştir. Bu evrelerin oluşturulmasından amaç ise, 1. evrede aktif sıcaklık kontrolü şartı altında radyometrenin çıkış gücü davranışını belirlemek, 3. evrede aktif sıcaklık kontrolü yok iken radyometrenin çıkış gücü davranışını belirlemek ve 2. evrede radyometre çıkış gücünün sıcaklık bağımlılığını belirlemektir.

Radyometrenin sıcaklık bağımlılığı ile sıcaklık değişimlerinden yararlanılarak 1. evre ve 3. evrelerde sıcaklık değişiminin çıkış gücüne olan etkisi hesaplanmıştır. En büyük değer, 3. evrede RF ünitesi için  $-1,26 \times 10^{-6}$  mW olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı evrede elde edilen çıkış gücünün değişiminden daha küçüktür. Dolayısı ile kontrollü laboratuvar şartları altında elektronik malzemelerin sıcaklık dağılımı iyi yapılmış bir radyometrede aktif sıcaklık kontrolünün kesin bir gereklilik olmadığı sonucu elde edilmiştir [37].

## **2.1. Toplam Güç Radyometre Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi**

Mikrodalga gürültü kaynaklarının ürettikleri gürültüyü ölçmek için Şekil 2.5’de blok gösterimi verilen bir toplam güç radyometre kurulmuştur. Toplam güç radyometre RF ünitesi, IF ünitesi, anahtar ünitesi, dedektör ünitesi, besleme kaynağı, bilgisayar ve cihazların kontrolü ve ölçümün gerçekleştirilmesi için bir yazılımdan oluşturulmuştur.

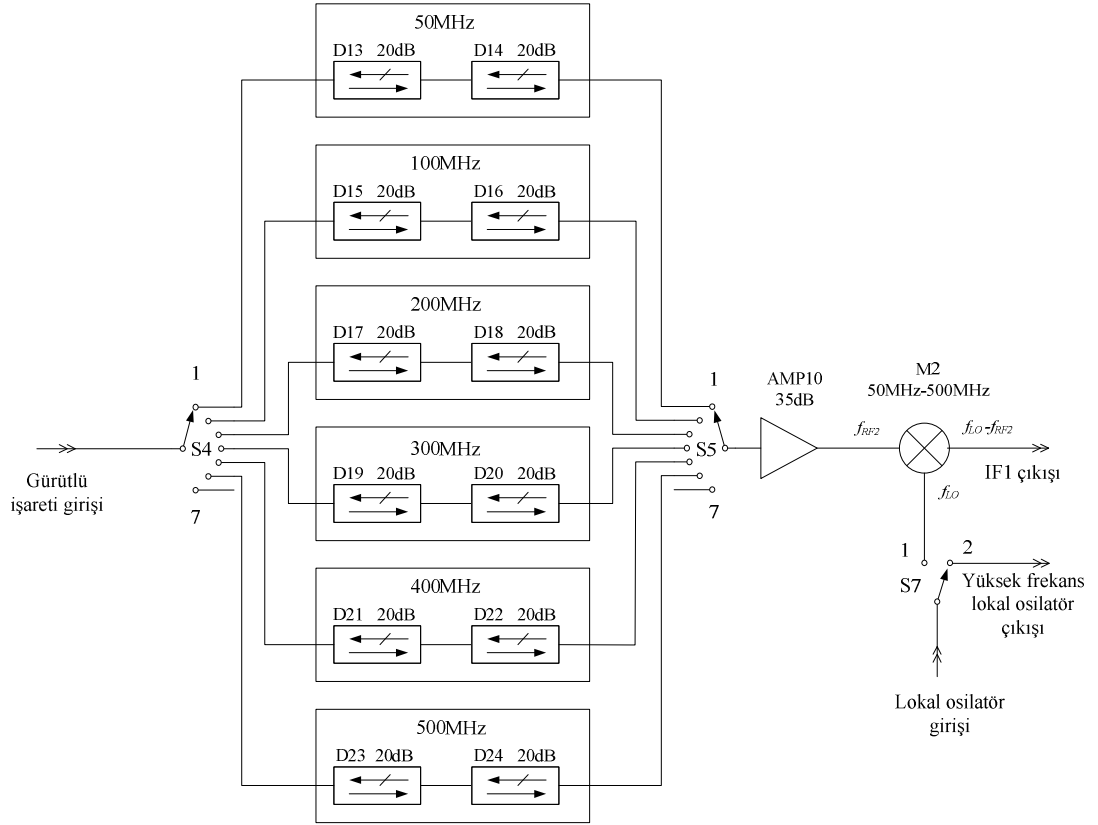


Şekil 2.5. Kurulan toplam güç radyometre blok gösterimi

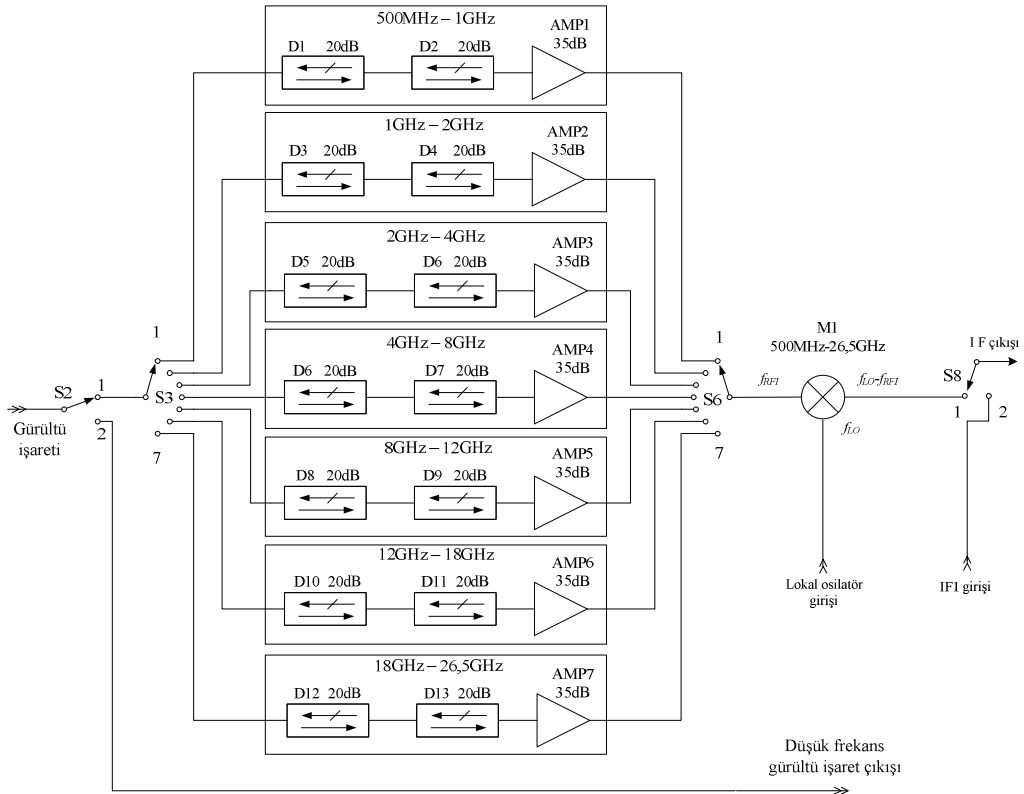
### 2.1.1. RF ünitesi

RF ünitesi mikrodalga işaretin işlendiği, farklı frekans bölgesinde çalışan kanallardan oluşmaktadır. Bu kanallar; 50 MHz, 100 MHz, 200 MHz, 300 MHz, 400 MHz, 500 MHz frekans noktalarında (Şekil 2.6) ve 500 MHz – 1 GHz, 1 GHz – 2 GHz, 2 GHz – 4 GHz, 4 GHz – 8 GHz, 8 GHz – 12 GHz, 12 GHz – 18 GHz, 18 GHz – 26,5 GHz frekans bölgelerinde (Şekil 2.7) çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.6’da verilen RF ünitesinde A-info marka JXWBGL-T-XX-XX-15 model izolatörler kullanılmıştır. Model numarasında XX-XX ile verilen kısım, izolatörün band genişliğini tanımlamaktadır ve burada kullanılan izolatörler 4 MHz band genişliğine sahiptirler. Örneğin 200 MHz için kullanılan izolatörün model numarası JXWBGL-T-198-202-15’dir. LNA olarak, Miteq marka AFS3 serisi 10 MHz – 1GHz frekans aralığında çalışan bir yükselteç kullanılmıştır. Mikser olarak ise, Mini Circuits ZFM-150 model cihaz tercih edilmiştir.

Şekil 2.7’de verilen RF ünitesinde, 500 MHz – 1 GHz, 1 GHz – 2 GHz, 2 GHz – 4 GHz ve 18 GHz – 26,5 GHz frekans bölgeleri için ilgili frekans bandını kapsayan Raditek marka, 4 GHz – 8 GHz ve 12 GHz – 18 GHz, frekans bölgesi için Ditom marka D3IXXX-2 model ve 8 GHz – 12 GHz frekans aralığı için Quest marka SR0812T13 model izolatörler kullanılmıştır.



Şekil 2.6. 50 MHz – 500 MHz RF devresi



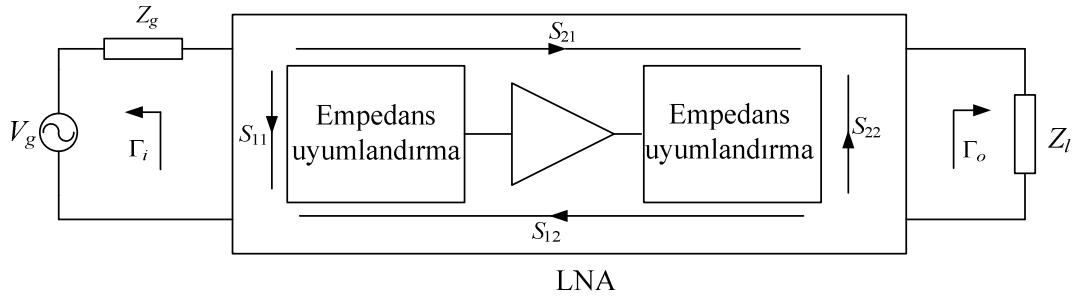
Şekil 2.7. 500 MHz – 26,5 GHz RF devresi



Sistemde kullanılan LNA'lar Miteq marka olup 500 MHz – 1 GHz, 1 GHz – 2 GHz, 2 GHz – 4 GHz ve 18 GHz – 26,5 GHz frekans bölgeleri için AFS3, 4 GHz – 8 GHz ve 8 GHz – 12 GHz frekans bölgesi için AFS4 ve 12 GHz – 18 GHz frekans bölgesi için AFS6 model yükselteçler kullanılmıştır. Mikser olarak ise, Marki microwave M40026LJ model bir cihaz kullanılmıştır. Sistemde iki seçme kanalına sahip mikrodalga anahtar olarak, Dow-Key marka 401K-4208 model cihaz tercih edilmiştir.

Her bir kanal girişindeki işaret, o frekans bölgesinde çalışan ve seri bağlı iki adet 20 dB değerindeki izolatör üzerinden düşük gürültülü yükselteç (low noise amplifier, LNA) girişine uygulanmıştır.

Şekil 2.8'deki devrede kullanılan LNA'nın kazancı, giriş ve çıkış yansımaya katsayılarına bağlı olarak Eşitlik (2.8)'de verildiği gibi değişim göstermektedir.



Şekil 2.8. Tipik bir LNA'nın devrede kullanılması

$$G_{LNA} = \frac{(1 - |\Gamma_i|^2) |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_o|^2)}{|(1 - S_{11}\Gamma_i)(1 - S_{22}\Gamma_o) - \Gamma_i S_{21} S_{12} \Gamma_o|^2} \quad (2.8)$$

Burada;

$\Gamma_i$ : Kaynak yansımaya katsayısı,

$S_{11}$ : LNA giriş yansımaya katsayısı,

$S_{22}$ : LNA çıkış yansımaya katsayısı,

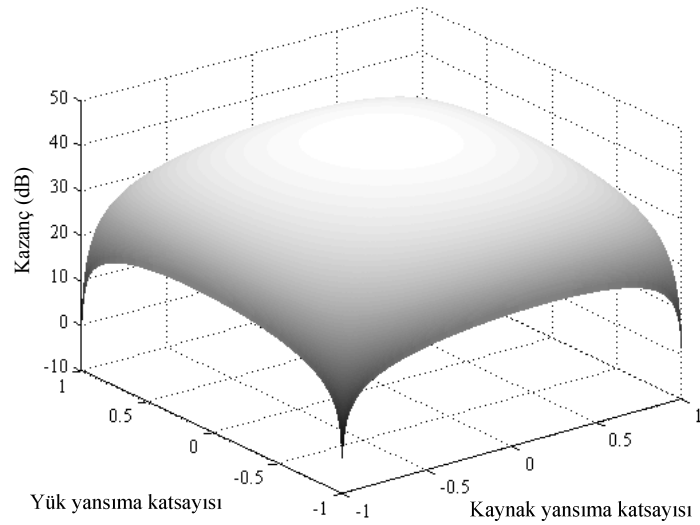
$S_{21}$ : LNA ileri yöndeki s-parametresi,

$S_{12}$ : LNA geri yöndeki s-parametresi,

$\Gamma_o$ : Yük yansımaya katsayısıdır.

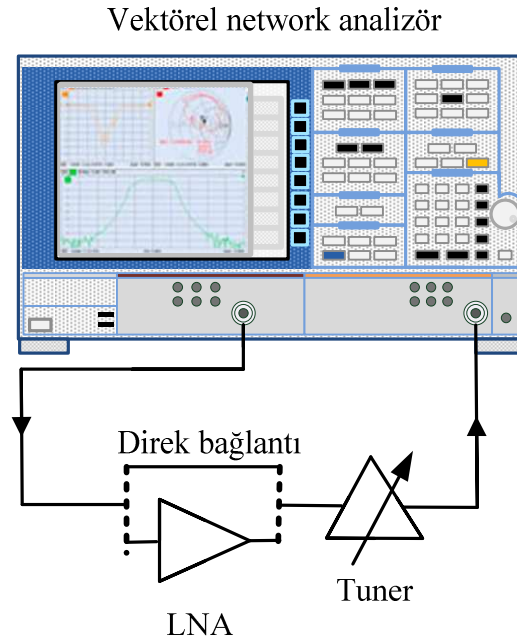
Ölçümde kullanılan üç adet gürültü kaynağı nedeni ile LNA girişine bu üç farklı gürültü kaynağının çıkışı bağlanmaktadır. Her gürültü kaynağının aynı yansıma katsayısına sahip olması mümkün olmadığından, her defasında LNA girişinde farklı bir yansıma katsayısı oluşacaktır. Bu durum, üç farklı kazançta neden olacaktır. Ölçüm süresince sabit kalması gereken radyometre kazancı da böylece değişmiş olacaktır. Kazancın giriş yansıma katsayılarına olan bağımlılığını azaltmak için gürültü kaynağı ile LNA giriş kapısı arasına izolatör bağlanmıştır. Böylece LNA giriş kapısı her seferinde değişken bir empedans ile karşılaşmayıp sürekli aynı izolatörün empedansı ile karşılaşacaktır.

Şekil 2.7’de verilen 500 MHz frekansının üzerindeki LNA’ların çıkışları doğrudan mikrodalga anahtar kanalına bağlanmıştır. Bu anahtar kanalları ise, ölçüm frekansına göre seçili olup, seçilen kanal mikser girişine bağlanmakta diğer anahtarlar ise açık kalmaktadır. Bu durumda seçilen anahtara bağlı LNA çıkışı karakteristik empedansa uyumlu yük ile sonlandırılmış olup diğer LNA çıkışları açık devredir. Eşitlik (2.8) göz önünde bulundurulduğunda, çıkışı ve girişi 0 ile  $\pm 1$  arasında değişen yansıma katsayısına sahip yükler ile sonlandırıldığında, 20 GHz’deki s-parametreleri  $S_{11}=0,1751+i0,16306$ ,  $S_{12}=0,00060+i0,00178$ ,  $S_{21}=93,195-i59,214$  ve  $S_{22}=0,1347-i0,1121$  olan LNA’nın (bu LNA sistemde kullanılan LNA’lara özdeş bir cihazdır) kazancının Şekil 2.9’da verildiği gibi değişim gösterdiği belirlenmiştir.



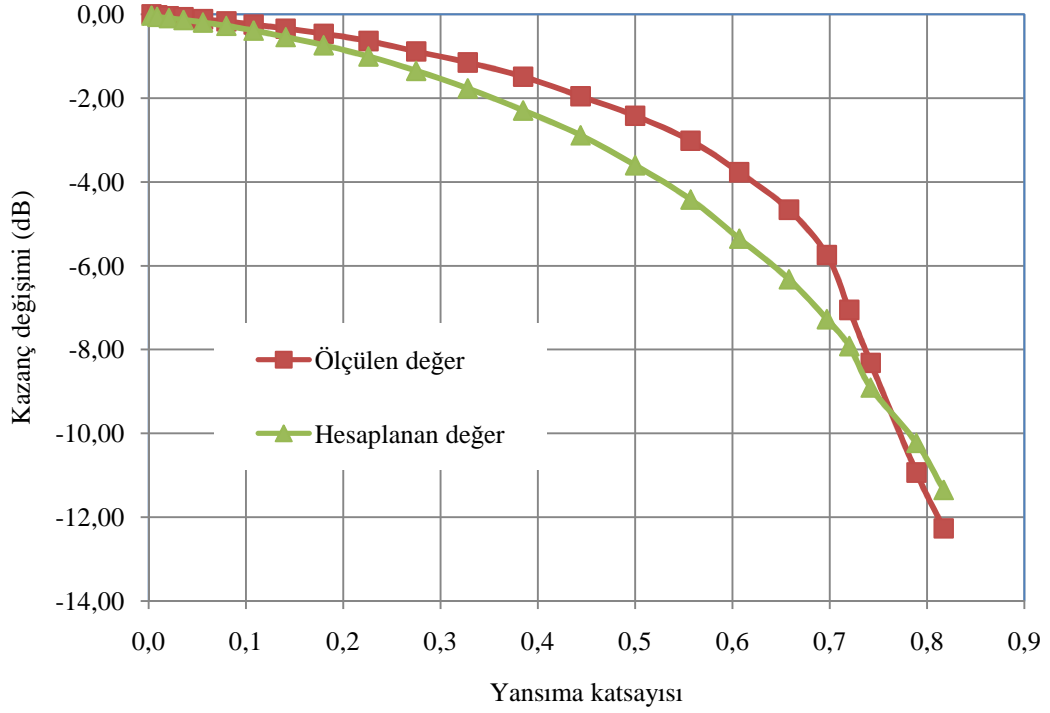
Şekil 2.9. LNA kazancının giriş ve çıkış empedansına bağlı değişimi

LNA girişine ve çıkışına bağlanan kaynak ve yük empedansına göre LNA kazancının değişimi oldukça yüksektir. Bu durumu deneysel olarak göstermek için yukarıda s-parametreleri verilen LNA çıkışına bir tuner bağlanmış ve kaynak empedansı sabit tutulurken yük yansıma katsayısı değiştirilmiştir. Şekil 2.10'da verilen düzeneği oluşturmak için önce tuner, VNA (HP8510C) kapıları arasında bağlanmış ve tunerin değişik yansıma katsayıları üreteceği ayar noktaları belirlenerek bu değerler not edilerek s-parametreleri ölçülmüştür. Daha sonra LNA, tuner ile VNA'nın birinci kapısı arasında bağlanarak LNA ve tunerin s-parametreleri her farklı tuner ayar noktaları için ölçülmüştür. Tuner'den oluşacak iletim katsayısı hatasını gidermek için yansıma katsayısının en iyi değerinde, LNA ve tunerin ölçülen iletim katsayısı referans alınmıştır.



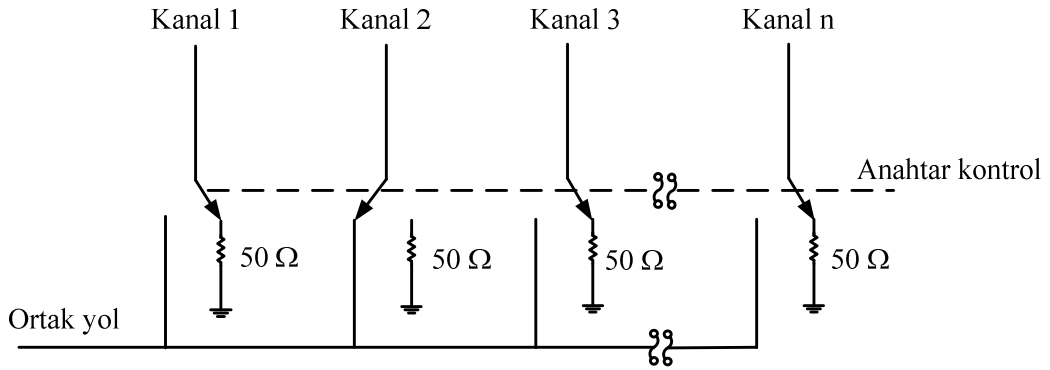
Şekil 2.10. LNA kazancının yük empedansına bağlı değişiminin ölçüm düzeneği

Elde edilen deneysel sonuçlar, hesaplanan sonuçlar ile kıyaslanmış ve her iki durumda elde edilen değişimlerin Şekil 2.11'de verildiği gibi birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.11. LNA kazancının yük empedansına bağlı değişimi

Tasarlanan radyometrede, LNA kaynak empedansı izolatörler ile sabit kılınmıştır. Oysa yük empedansı doğrudan anahtara bağlı olduğundan LNA çıkışına bağlanan yük, açık devre ile karakteristik empedansa uyumlu yük arasında değişim gösterecektir. Değişken yük empedansı LNA kazancında çok ciddi değişime neden olmaktadır. Değişkenliği azaltarak LNA'nın radyometre kazanç değişimi üzerindeki etkisini en aza indirmek için sistemde, Şekil 2.12'de verilen Dow-Key 571K-420803 model bir mikrodalga anahtar yapısı kullanılmıştır. Bu anahtarlar, sistemde yedi kanal gösterilen tüm yerlerde kullanılmıştır.

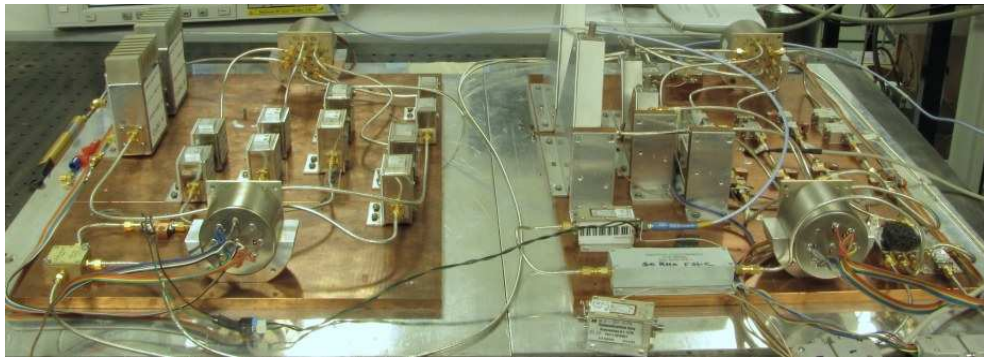


Şekil 2.12. Mikrodalga anahtar yapısı

Bu mikrodalga anahtarda her kanal, kullanılsın veya kullanılmasin sürekli karakteristik empedans veya uyumlu bir yük ile sonlandırılmaktadır. Şöyle ki, eğer mikrodalga anahtar devrede ise zaten diğer uçtan başka bir devre elemanı ile sonlandırıldığından LNA yüklenmiştir. Kanal ölçümde kullanılmıyor ise bu durumda bu kanalın ucu 50  $\Omega$ 'luk bir yük ile doğrudan sonlandırılmaktadır. Böylece, LNA ölçümde kullanılsın ya da kullanılmasin sürekli 50  $\Omega$  ile sonlandırılmış olmaktadır.

LNA, ilgili frekans bandında olduğundan, aynı zamanda bir bant geçiren filtre görevi görür. RF bölümünde kullanılan LNA'nın kendi ürettiği gürültü değeri, radyometrenin ürettiği toplam gürültü değeri açısından önemli olduğundan küçük olmalıdır. Bu nedenle yükselteç seçiminde, gürültü değeri küçük olan yükselteç tercih edilmiştir. Yükselteç, yükseltme işlemini gerçekleştirirken üzerinde bir ısı oluşur. Bu ısının sebep olacağı sıcaklık, sistem kazancı üzerinde etkili olacağından LNA, üzerindeki sıcaklığı alarak ısı dengeyi sağlayacak biçimde, Şekil 2.13'de gösterildiği gibi büyük bir bakır blok üzerine monte edilmiştir. LNA ile yükseltileen RF işareti, bir mikser ile ara frekansa indirgenmiştir.

Geniş bantta bir radyometre gerçekleştirmek, sistemde kullanılan dar bantlı LNA ve izolatör gibi malzemeler nedeni ile kolay değildir. Radyometreyi geniş bantlı gerçekleştirmek için bir takım mikrodalga anahtarlar kullanılarak sistemin geniş bantlı olması sağlanmıştır.

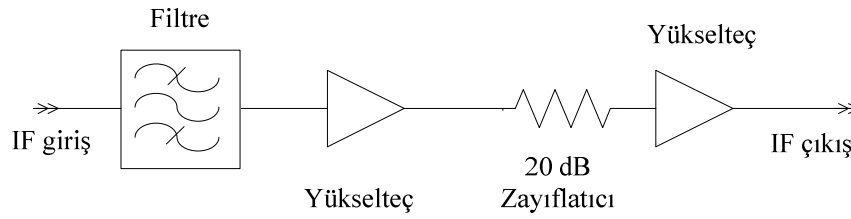


Şekil 2.13. Bakır blok üzerine mikrodalga malzemelerin montajlanmış hali

### 2.1.2. IF ünitesi

IF ünitesine gelen işaretin 30 MHz olması hedeflenmiştir. Bunun için lokal osilatör frekansı, gürültü kaynağı frekansı ile arasında 30 MHz fark olacak şekilde

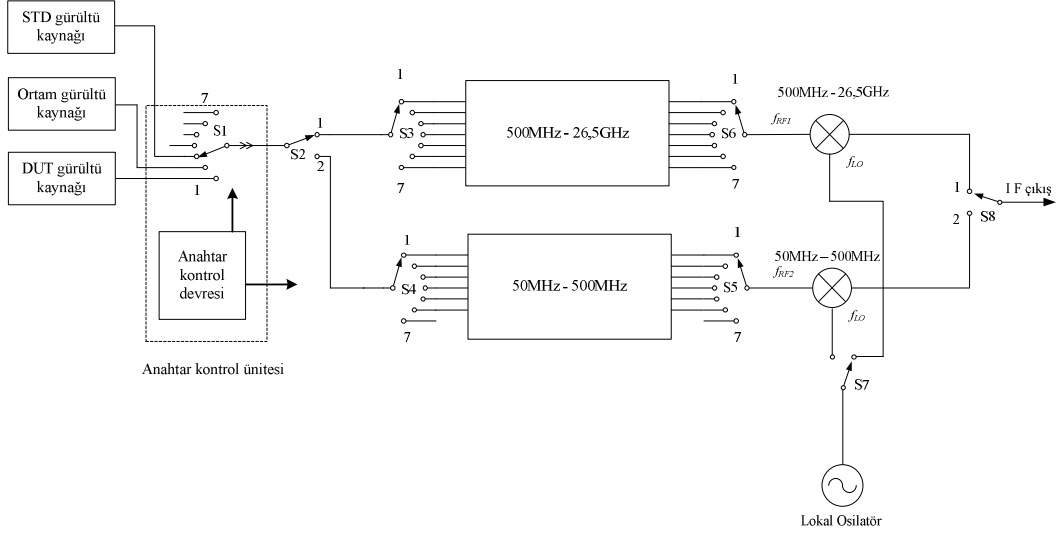
seçilmiştir. İşaret, Şekil 2.14’de verildiği gibi bir bant geçiren filtreden (Anatech Electronics marka B6353 model) geçirilmiştir. Filtrelenen işaret iki adet yükseltece uygulanarak güç algılayıcısından okunabilecek seviyeye yükseltilmiştir. Girişe uygulanacak gürültü işaretinin seviyesi göz önüne alındığında (5 dB veya 15 dB), IF ünitesinin kazancının yaklaşık olarak 50 dB civarlarında olması gerekmektedir. Bunun için, her birinin kazancı yaklaşık 35 dB olan iki adet HD marka HD19462 model IF yükselteç kullanılmıştır (Şekil 2.14). İkinci yükselteç girişine gelen işaret seviyesi yükselteç için fazla olduğunda bu yükseltecin kazancı doyuma gideceğinden, IF ünitesinin kazancını ayarlamak üzere iki yükselteç arasına JFW marka 50HF-02SMA model 020 dB değerinde sabit zayıflatıcı bağlanarak her iki yükseltecin de doğrusal bölgede çalışması sağlanmıştır. IF çıkıştan elde edilen güç Agilet E4423A model bir güç algılayıcısı ve bu cihaz ile uyumlu bir güç metre kullanılarak ölçülmüştür. IF ünitesinin sıcaklık değişiminin kaynaklanacak etkilerini en aza indirmek için yerleşimi Şekil 2.13’de gösterildiği gibi bakır blok üzerine gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.14. IF ünitesi

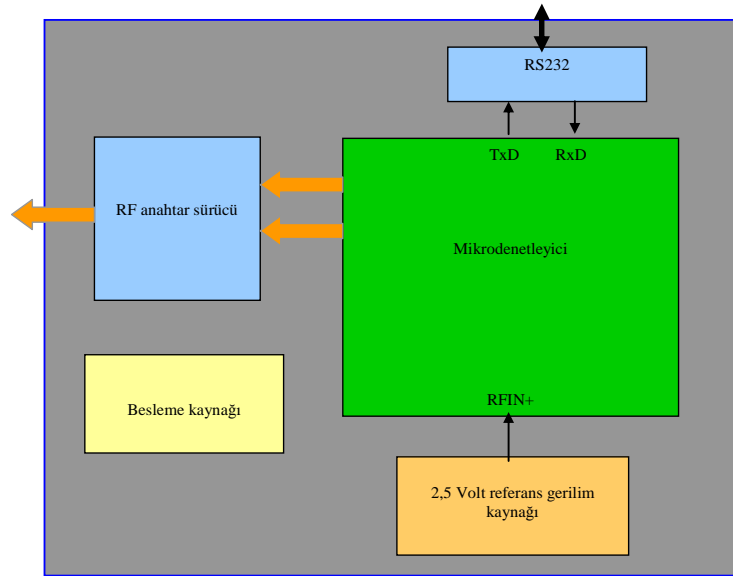
### 2.1.3. Anahtar ünitesi

Toplam güç radyometresi kullanarak bir gürültü kaynağının değeri ölçülmek istendiğinde değeri bilinen standart (STD), ortam sıcaklığı (ambient) gürültü kaynağı ve daha sonra da değeri bilinmeyen (DUT) gürültü kaynağı radyometre girişine bağlanır. Bu gürültü kaynaklarına ait elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak bilinmeyen gürültü sıcaklığı hesaplanır. Gürültü kaynaklarının her seferinde operatör tarafından bağlanmasını engellemek için radyometre girişinde Şekil 2.15’deki gibi bir mikrodalga anahtar kullanılmıştır (S1).



Şekil 2.15. Anahtar kontrol ünitesi ve mikrodalga anahtarlar

Bu anahtarın konumunun seçilmesi ile hangi gürültü kaynağının radyometreye bağlanacağı belirlenmektedir. Anahtar ünitesinin bir diğer bölümü ise, anahtar kontrol devresidir. Radyometrenin otomatik olarak kontrol edilebilmesi için, bu anahtarın yazılım kontrollü olması gerekmektedir. Bu nedenle, Şekil 2.16’da blok diyagramı verilen bir anahtar kontrol ünitesi tasarlanmıştır.



Şekil 2.16. Anahtar kontrol elektronik şeması

Anahtar kontrol devresi bir mikroişlemci yapı içermektedir. Mikroişlemci yapı, giriş bilgisini gürültü ölçme yazılımından almaktadır. Bu bilgi, hangi mikrodalga anahtarın hangi konuma alınması gerektiği yönündedir. Gelen bilgi burada

işlenmekte ve mikrodalga anahtarı kontrol eden çıkış bilgisi üretilmektedir. Böylece ilgili anahtarın doğrudan kontrol edilebilmesine imkan sağlanmaktadır.

Anahtar kontrol devresi aynı zamanda sistem içerisinde mikrodalga kanal ve mikser seçimlerinde kullanılan diğer anahtarların (S2 – S8) konumlarının seçilmesi için de kullanılmaktadır.

#### **2.1.4. RF anahtarları**

Radyometrenin tasarımında kullanılan izolatör, LNA ve mikserlerin dar-bantlı olması nedeni ile, tek eleman kullanılarak 50 MHz – 26,5 GHz frekans aralığındaki tüm bandı kapsayan bir radyometre üretimi mümkün değildir. Radyometrenin geniş bantlı olarak kullanılabilmesi için farklı frekanslarda çalışan elemanların bir arada çalışması gerekmektedir. Bu elemanları bir araya getirecek geniş bantlı bir radyometre oluşturmak için mikrodalga anahtarlar kullanılmıştır. Mikrodalga anahtarların kullanımı ile bir operatöre ihtiyaç olmadan devre elemanlarının bağlantısı sağlanmış ve geniş frekans bölgesinde sürekli bir çalışma imkanı oluşturulmuştur.

Radyometrenin RF Bölümü, 50 MHz – 500 MHz ve 500 MHz – 26,5 GHz frekans alanını kapsayan iki ayrı üniteden oluşturulmuştur. RF ünitesinin seçiminde S2 ve S8 anahtar çifti kullanılmıştır.

Her iki ünite de geniş frekans bandında izolatör ve LNA olmadığından 50 MHz – 500 MHz ünitesi altı adet frekans noktasından ve 500 MHz – 26,5 GHz ünitesi yedi banttan oluşturulmuştur. 50 MHz – 500 MHz frekans ünitesinde S4 ve S5, 500 MHz – 26,5 GHz frekans ünitesinde S3 ve S6 anahtar çiftleri kullanılmıştır.

Radyometrenin girişine bağlanan gürültü kaynaklarının seçiminde S1 anahtarı kullanılmıştır. Yüksek frekanstaki işareti düşük frekanslara çevirme işleminde radyometrede iki adet mikser kullanılmış ve bu mikserlerin seçiminde ise S7 anahtarı kullanılmıştır.



### 2.1.5. Anahtar kontrol cihazı

Şekil 2.16’da blok gösterimi verilen anahtar kontrol cihazı, RS232 seri haberleşme yolu üzerinden kontrol edilmektedir. Kontrol işleminde Hyper terminal®, Visual Basic® veya benzeri programlar kullanılabilir. Cihaz, RS232 seri port üzerinden “a”, “b”, ...”i” gibi karakterler ile kumanda edilmektedir. Hangi karakterin hangi anahtarı seçtiği Tablo 2.1’de verilmiştir.

Her bir anahtara gerçekleştirilen bağlantı için cihazın arka paneline ayrı konnektörler konmuştur. Konnektörlerin arka panel üzerindeki görüntüleri Şekil 2.17’de, isimleri ve görevleri de Tablo 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.17. Anahtar kontrol cihazı arka panel görüntüsü

### 2.1.6. Ölçüm yazılımı

Geniş bantlı gürültü kaynaklarının toplam güç radyometre ile ölçümlerini otomatik olarak gerçekleştirmek için Microsoft® Visual Basic® programı kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Ölçme sisteminde kullanılan gürültü kaynaklarının ve ölçme frekans bantlarının seçilmesi ve ölçüm cihazlarının kontrolü için bu yazılımdan yararlanılmıştır. Yazılım için oluşturulan akış diyagramı Şekil 2.18’de verilmiştir. Ölçümde kullanılan gürültü kaynaklarına ait bilgiler, ölçüm frekansları, lokal osilatör tarafından uygulanacak güç değeri, ölçümü gerçekleştiren operatör, laboratuvar ortam şartları ve operatörün belirtmek istediği diğer bilgilerin girilmesi için Şekil 2.19’da verilen arayüz kullanılmıştır.

Tablo 2.1. Anahtar seçme tablosu

| Anahtar numarası | Komut | Açıklama                 |
|------------------|-------|--------------------------|
| S2               | L     | 50 MHz – 500MHz bandı    |
|                  | H     | 500 MHz – 26,5GHz bandı  |
| S7, S8           | M     | 50 MHz – 500MHz bandı    |
|                  | C     | 500 MHz – 26,5GHz bandı  |
| S1               | I     | DUT gürültü kaynağı      |
|                  | N     | Ortam gürültü kaynağı    |
|                  | P     | X1 gürültü kaynağı (boş) |
|                  | U     | STD gürültü kaynağı      |
|                  | T     | X2 gürültü kaynağı (boş) |
|                  | S     | X3 gürültü kaynağı (boş) |
| S4, S5           | a     | 50 MHz                   |
|                  | b     | 100 MHz                  |
|                  | c     | 200 MHz                  |
|                  | d     | 300 MHz                  |
|                  | e     | 400 MHz                  |
|                  | f     | 500 MHz                  |
|                  | g     | Boş                      |
| S3, S6           | h     | 500 MHz – 1 GHz          |
|                  | i     | 1 GHz – 2 GHz            |
|                  | j     | 2 GHz – 4 GHz            |
|                  | k     | 4 GHz – 8 GHz            |
|                  | l     | 8 GHz – 12 GHz           |
|                  | m     | 12 GHz – 18 GHz          |
|                  | n     | 18 GHz – 26,5 GHz        |

Tablo 2.2. Konnektör tanımlaması ve bağlantıları

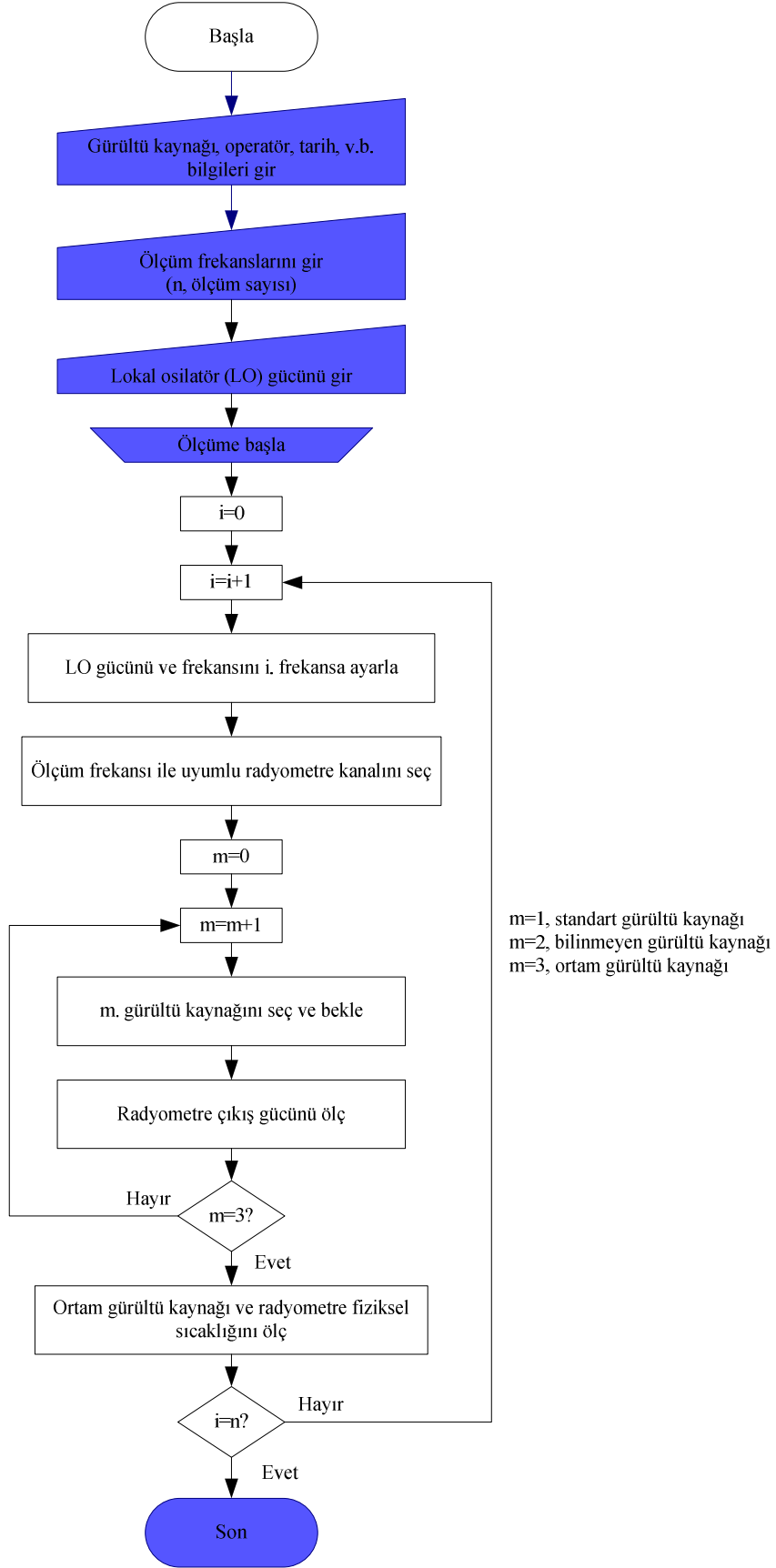
| Kanal | Açıklama                    |
|-------|-----------------------------|
| CH-1  | Lokal Osilatör seçimi       |
| CH-2  | 50 MHz – 500 MHz bantları   |
| CH-3  | Gürültü Kaynakları          |
| CH-4  | 500 MHz – 26,5 GHz bantları |
| CH-5  | Boş                         |

Yazılımda, standart gürültü kaynağının olduğu kanal S1 anahtarı, ölçülecek frekansla uyumlu kanal ise S2 – S8 anahtarları kullanılarak seçilmektedir. Lokal osilatör uygun frekansa ayarlanıp sistem kararlılığı için beklendikten sonra, güç metrenin göstergesinden okunan güç verisi alınmaktadır. Daha sonra aynı işlemler frekans değiştirilmeden bilinmeyen gürültü kaynağı ve ortam gürültü kaynağı seçilerek tekrar edilmektedir. Ortam gürültü kaynağı olarak kullanılan yükün fiziksel sıcaklığını ölçmek için, değeri sıcaklık ile değişen bir direnç (NTC) kullanılmıştır. Benzer bir NTC’de radyometre sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Bu NTC’lerin dirençleri multimetre kullanılarak 4-uçlu ölçme yöntemiyle ölçülmektedir. Tüm bu ölçümler üç

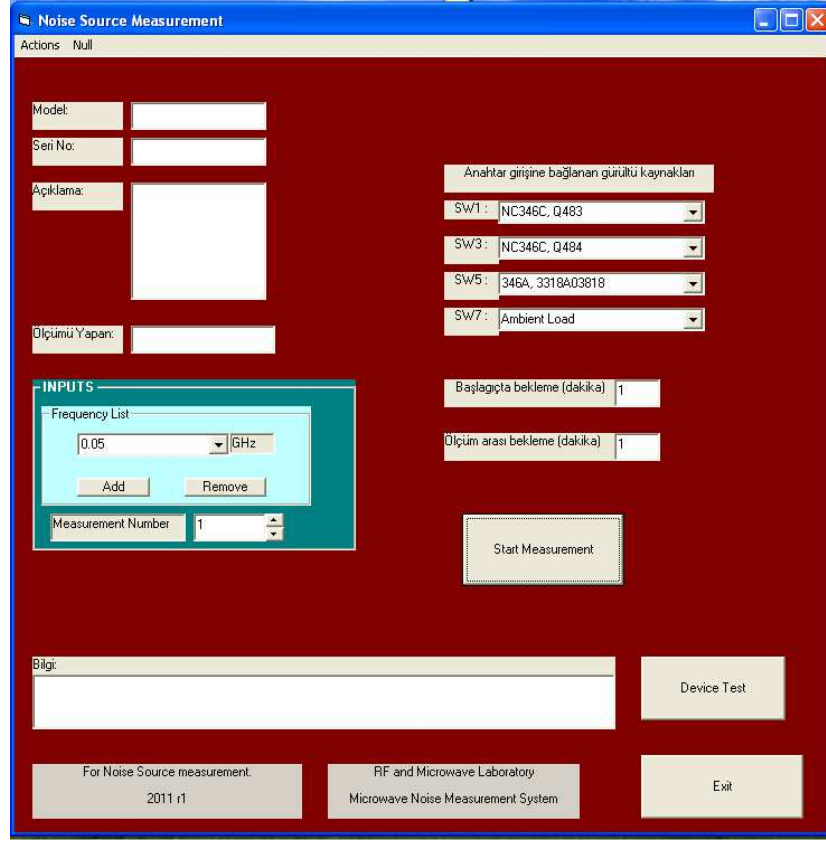
dakika içerisinde bitirilmektedir. Sonraki frekansta ölçüm almak için ölçüm basamakları tekrarlanmaktadır. Ölçülecek tüm frekanslar tamamlandığında program ölçümü sonlandırmaktadır.

## **2.2. Radyometrenin Karakterizasyonu**

Toplam güç radyometresini karakterize etmek için iki adet NC346C model numaralı nominal 15 dB aşırı gürültü oranına (excess noise ratio, ENR) sahip yarı iletken gürültü kaynağı ve bir adet ortam gürültü kaynağı kullanılmıştır. Her iki yarı iletken gürültü kaynağının kalibrasyonu, İngiltere metroloji enstitüsü olan National Physical Laboratory (NPL) tarafından yapılmıştır. Bu gürültü kaynaklarından bir tanesi standart (STD) diğeri ise bilinmeyen (DUT) olarak seçilmiştir. Ölçümden elde edilen değerler ve radyometre parametreleri Eşitlik (2.7)'de yerine konarak DUT'ye ait gürültü sıcaklığı hesaplanmıştır.



Şekil 2.18. Ölçüm yazılımının akış diyagramı

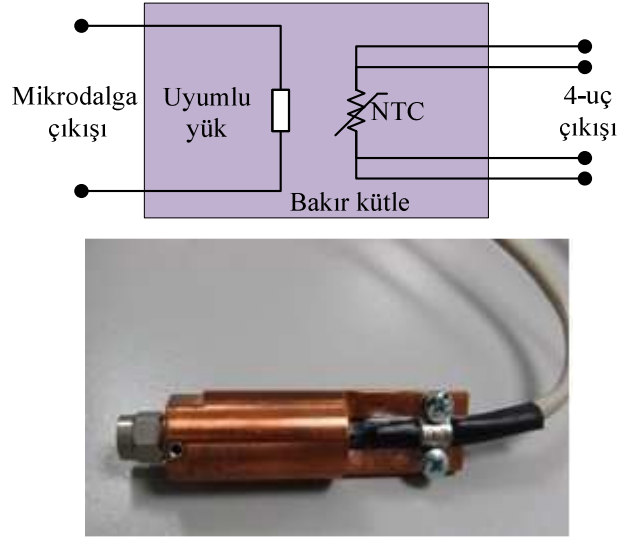


Şekil 2.19. Gürültü kaynağı ölçümünde kullanılan yazılımın arayüzü

### 2.2.1. Ortam gürültü kaynağı

Eşitlik (2.7)'de verilen  $T_a$  parametresi ortam gürültü kaynağının gürültü sıcaklığıdır. Ortam gürültü kaynağı olarak 3,5 mm (erkek) konnektör yapısına sahip bir adet 50  $\Omega$  uyumlu yük bakır bir kütle içerisine yerleştirilerek oluşturulmuştur. Aynı zamanda yükün fiziksel sıcaklığını belirleyebilmek için nominal 100  $\Omega$  direnç değerine sahip bir NTC, aynı bakır kütle içerisine monte edilmiştir. Yapımı gerçekleştirilen ortam gürültü kaynağının devresi ve fotoğrafı Şekil 2.20'deki gibidir.

Ortam gürültü kaynağı çıkışında elde edilen mikrodalga gürültü gücü, uyumlu yük üzerindeki fiziksel sıcaklık değerinden yararlanılarak hesaplanır. Uyumlu yük üzerindeki sıcaklık değeri, HP3458A model 8½ dijital sayısal bir multimetre ile NTC'nin direnç değeri ölçülerek belirlenmiştir. Direnç-sıcaklık ilişkisini belirlemek için NTC'nin bilinen bir sıcaklıkta karakterize edilmesi gerekir. Burada kullanılan NTC'nin karakterizasyonu için TÜBİTAK UME Direnç Laboratuvarı'nda sıcaklık değeri oldukça hassas bir şekilde ayarlanabilen bir yağ banyosu kullanılmıştır.



Şekil 2.20. Ortam gürültü kaynağı devresi ve fotoğrafı

Yağ banyosu, 18 °C – 29 °C arasında değişik sıcaklık değerlerine ayarlanmış ( $T$ ) ve değeri bilinen sıcaklık değerlerine karşılık NTC direnci ( $R$ ) ölçülerek NTC'nin direnç-sıcaklık eğrisi, Eşitlik (2.9)'daki gibi oluşturulmuştur.

$$T = -0,0033R^6 + 2,177R^5 - 596,034R^4 + 87018,03R^3 - 7,146 \cdot 10^6 R^2 + 312,95 \cdot 10^6 R - 5,71 \cdot 10^9 \quad (2.9)$$

Radyometrenin karakterizasyonu için gerçekleştirilen ölçümde, her bir frekansa karşılık multimetreden 10 adet değer okunmuş ve bu değerlerin ortalamaları Şekil 2.21'de verilmiştir. Ölçülen direnç değerleri, altıncı dereceden bir polinom kullanılarak oluşturulan sıcaklık-direnç eğri denkleminde yerine konularak buna karşılık gelen sıcaklık değerleri Şekil 2.21'deki gibi elde edilmiştir.

Hesaplanan santigrat derece cinsindeki fiziksel sıcaklık Kelvin'e dönüştürülmüştür. Fiziksel sıcaklığın iletim hattındaki karşılığını bulabilmek için, fiziksel sıcaklığa kuantum düzeltmesi Eşitlik (2.10)'daki gibi yapılmıştır [82].

$$T_n = \frac{\frac{hf}{k}}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (2.10)$$

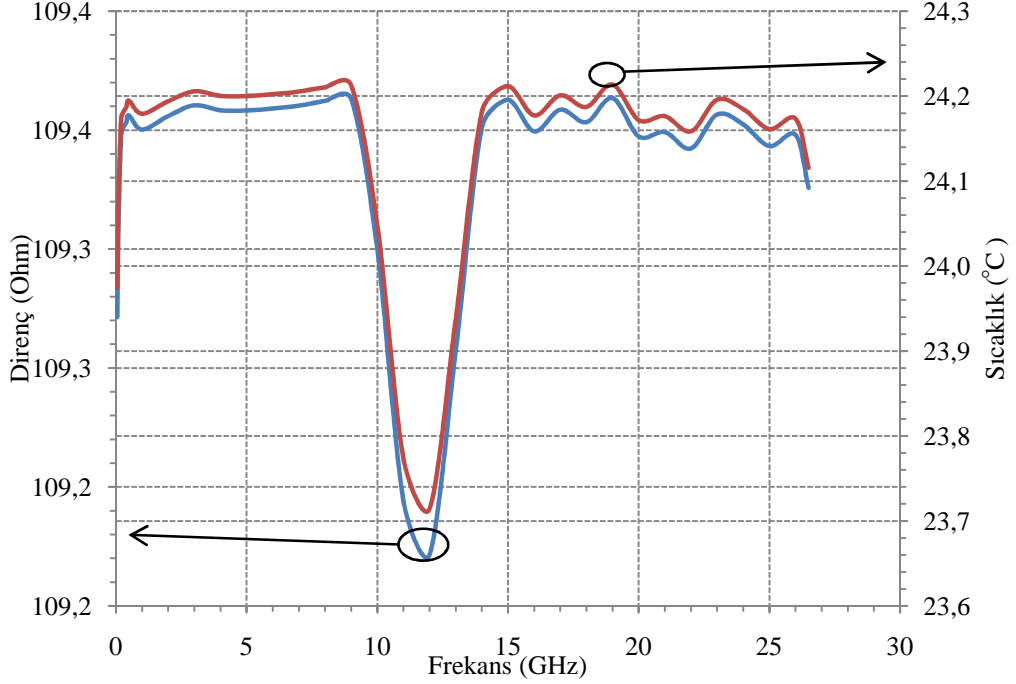
burada,

$h$ : Plank sabiti ( $6,626 \times 10^{-23}$  J s),

$f$ : frekans (Hz),

$k$ : Boltzman katsayısı ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K),

$T$ : Fiziksel sıcaklık (K).

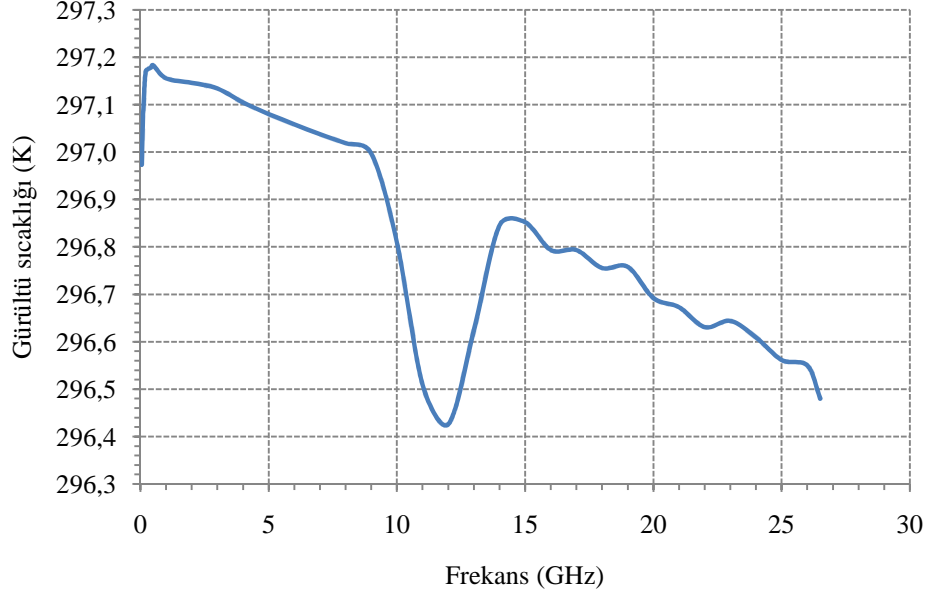


Şekil 2.21. Ortam gürültü kaynağı direnci ve fiziksel sıcaklığı

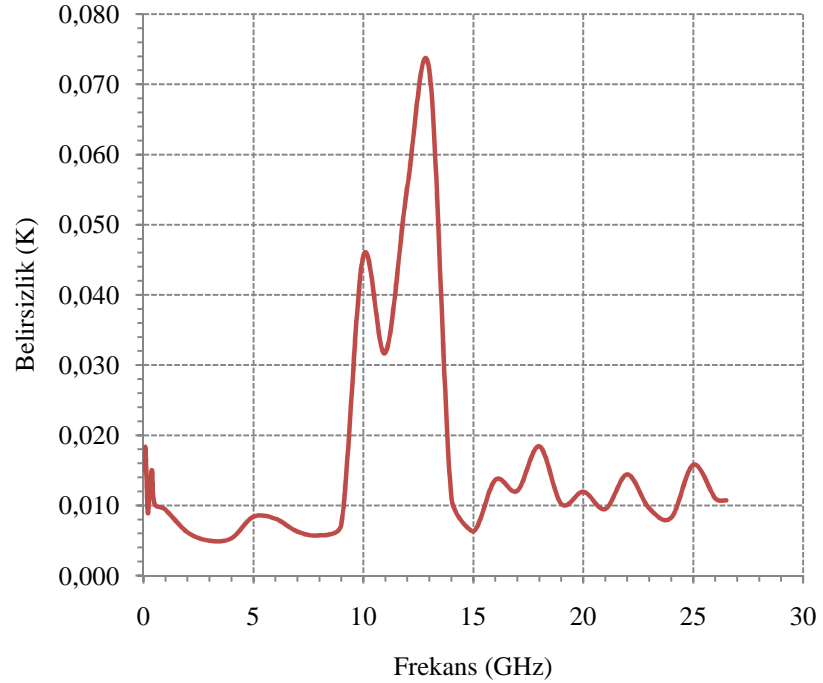
° Kuantum düzeltmesi yapılmış mikrodalga gürültü sıcaklığının Kelvin cinsinden grafiği Şekil 2.22'de verilmiştir. Ortam gürültü kaynağının sıcaklık değeri belirlendikten sonra, bu değere ait belirsizliğin hesaplanmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Ek A'da verildiği gibi belirsizlik, A tipi ve B tipi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır [83]. Kısa dönemli, rastgele nedenlerden oluşan A tipi belirsizlik 10 adet ölçümün standart sapmasından elde edilmiştir. B tipi belirsizlik ise cihaz ve hesaplama gibi önceden tahmin edilebilen kaynaklardan oluşmaktadır. B tipi belirsizlik kaynakları olarak HP3458A multimetre, yağ banyosu, polinom yaklaşıklığı ve kuantum düzeltmesi olarak alınmıştır.

Ölçümde kullanılan multimetre belirsizliği  $8 \mu\Omega/\Omega$  (0,0045 K), yağ banyosu belirsizliği 20 ppm (0,0005 K) ve polinom belirsizliği ise 0,0051 K olarak hesaplanmıştır. Bu değerler dikedörtgen dağılıma sahiptirler. Kuantum düzeltmesi nedeni ile yapılan hesaplardan gelen belirsizlik ( $\delta T_n/\delta T$ ) ise sonucu etkilemeyecek

kadar küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Ortam gürültü kaynağına ait gürültü sıcaklığının belirsizlik değeri karesel ortalama yöntemi ile hesaplanmıştır. Ölçümlerden elde edilen belirsizlik değeri Şekil 2.23’de verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 2.22. Ortam gürültü kaynağının çıkış gürültü sıcaklığı



Şekil 2.23. Ortam gürültü kaynağının gürültü sıcaklığı belirsizliği



### 2.2.2. Standart gürültü kaynağı

Değeri bilinmeyen gürültü kaynağının gürültü sıcaklığını hesaplayabilmek için kullanılan standart gürültü kaynağı, gürültü sıcaklığı bilinen NC346C model bir gürültü kaynağıdır. Gürültü kaynağının sertifikasında verilen gürültü sıcaklığı, gürültü sıcaklığı belirsizliği ve gürültü kaynağına besleme uygulanmış iken yansıma katsayısı değerleri Tablo 2.3’de verilmiştir. Yansıma katsayısı büyüklüğüne ait belirsizlik değeri ise tüm frekanslar için 0,01 ( $k=2$ ) olarak alınmıştır.

Tablo 2.3. Standart gürültü kaynağı sertifika değerleri

| Frekans (GHz) | Sıcaklık (K) | Belirsizlik ( $k=2$ ) (K) | Yansıma katsayısı ( $\Gamma$ ) | Frekans (GHz) | Sıcaklık (K) | Belirsizlik ( $k=2$ ) (K) | Yansıma katsayısı ( $\Gamma$ ) |
|---------------|--------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|--------------|---------------------------|--------------------------------|
| 0,01          | 11400        | 200                       | 0,025                          | 12            | 9320         | 250                       | 0,074                          |
| 0,03          | 7980         | 210                       | 0,027                          | 13            | 11400        | 200                       | 0,096                          |
| 0,06          | 7970         | 140                       | 0,027                          | 14            | 11930        | 380                       | 0,111                          |
| 0,1           | 8030         | 140                       | 0,027                          | 15            | 11130        | 270                       | 0,082                          |
| 0,3           | 7890         | 110                       | 0,025                          | 16            | 11670        | 360                       | 0,079                          |
| 0,6           | 7770         | 110                       | 0,021                          | 17            | 12070        | 240                       | 0,097                          |
| 1             | 7530         | 110                       | 0,016                          | 18            | 11280        | 350                       | 0,083                          |
| 2             | 7190         | 110                       | 0,035                          | 19            | 10750        | 370                       | 0,072                          |
| 3             | 6620         | 100                       | 0,048                          | 20            | 11950        | 370                       | 0,098                          |
| 4             | 6540         | 100                       | 0,03                           | 21            | 12580        | 490                       | 0,1                            |
| 5             | 7100         | 150                       | 0,021                          | 22            | 10870        | 310                       | 0,085                          |
| 6             | 7230         | 110                       | 0,063                          | 23            | 9920         | 270                       | 0,109                          |
| 7             | 6830         | 120                       | 0,073                          | 24            | 9950         | 470                       | 0,11                           |
| 8             | 7240         | 120                       | 0,052                          | 25            | 8290         | 380                       | 0,076                          |
| 9             | 8660         | 140                       | 0,058                          | 26            | 7210         | 370                       | 0,075                          |
| 10            | 9400         | 160                       | 0,096                          | 26,5          | 6640         | 400                       | 0,078                          |
| 11            | 8770         | 140                       | 0,093                          | -             | -            | -                         | -                              |

### 2.2.3. Gürültü kaynağı seçme anahtarı

Radyometre ile mikrodalga gürültüsünü ölçmek için, radyometre girişinde bulunan mikrodalga anahtar (S1) ile ölçülecek olan gürültü kaynağı seçilmiştir. Böylece standart, ortam veya değeri bilinmeyen gürültü kaynaklarından hangisinin radyometreye bağlanacağı belirlenmiştir. Her bir gürültü kaynağı mikrodalga anahtarın farklı bir yoluna bağlı olduğundan, gürültü işareti radyometre girişine ulaşana kadar farklı yollar izler. Böylece her bir işaret farklı bir zayıflatma ve

yansıma ile karşılaşmış olur. Her bir yoldaki farklı zayıflatma ve yansıma hatasını telafi etmek için mikrodalga anahtar etkinliği ( $\eta_x$  ve  $\eta_s$ ) ve uyumsuzluk katsayısı ( $M_x$  ve  $M_s$ ) olarak adlandırılan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

Anahtar etkinliği,

$$\eta_{s,x} = \frac{(1 - |\Gamma_I|^2) |S_{21_{s,x}}|^2}{(1 - |\Gamma_{ss, sx}|^2) |1 - S_{22_{s,x}} \Gamma_I|^2} \quad (2.11)$$

olarak verilmektedir. Burada,  $S_{21_{s,x}}$  ve  $S_{22_{s,x}}$  standart ve bilinmeyen gürültü kaynaklarının bağlandığı farklı anahtar yollarının s-parametreleri,  $\Gamma_{ss, sx}$  anahtarın giriş yansıma katsayısı ve  $\Gamma_I$  radyometre giriş yansıma katsayısıdır. Radyometre ile gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen etkinlik değerleri Şekil 2.24’de verilmiştir.

Etkinlikten kaynaklanan belirsizlik, standart gürültü kaynağı için  $\pm 2 |\Gamma_I| |S_{22_s}|$  ve bilinmeyen gürültü kaynağı için  $\pm 2 |\Gamma_I| |S_{22_x}|$  eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler U-dağılımına sahiptir.

Uyumsuzluk katsayısı,

$$M_{s,x} = \frac{(1 - |\Gamma_{s,x}|^2) (1 - |\Gamma_{ss, sx}|^2)}{|1 - \Gamma_{ss, sx} \Gamma_I|^2} \quad (2.12)$$

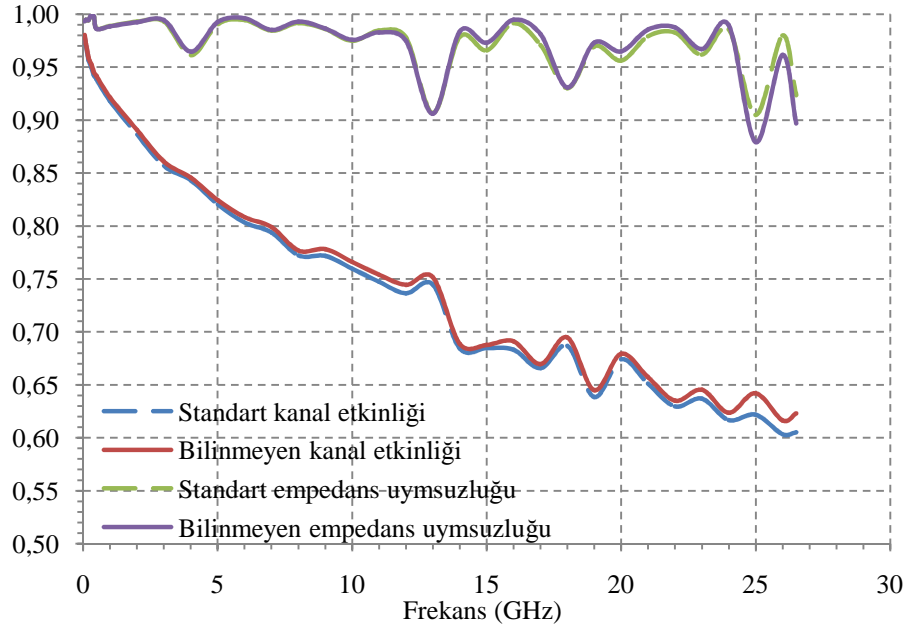
ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada,  $\Gamma_s$  ve  $\Gamma_x$  sırasıyla standart ve bilinmeyen gürültü kaynakları yansıma katsayısıdır. Yansıma katsayısı değerleri kullanılarak hesaplanan uyumsuzluk katsayısı değerleri Şekil 2.24’de verilmiştir.

Uyumsuzluk katsayısından kaynaklanan belirsizlik, standart gürültü kaynağı için  $\pm 2 |\Gamma_s| | \Gamma_{ss} |$  ve bilinmeyen gürültü kaynağı için  $\pm 2 |\Gamma_x| | \Gamma_{sx} |$  eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler U-dağılımına sahiptir.

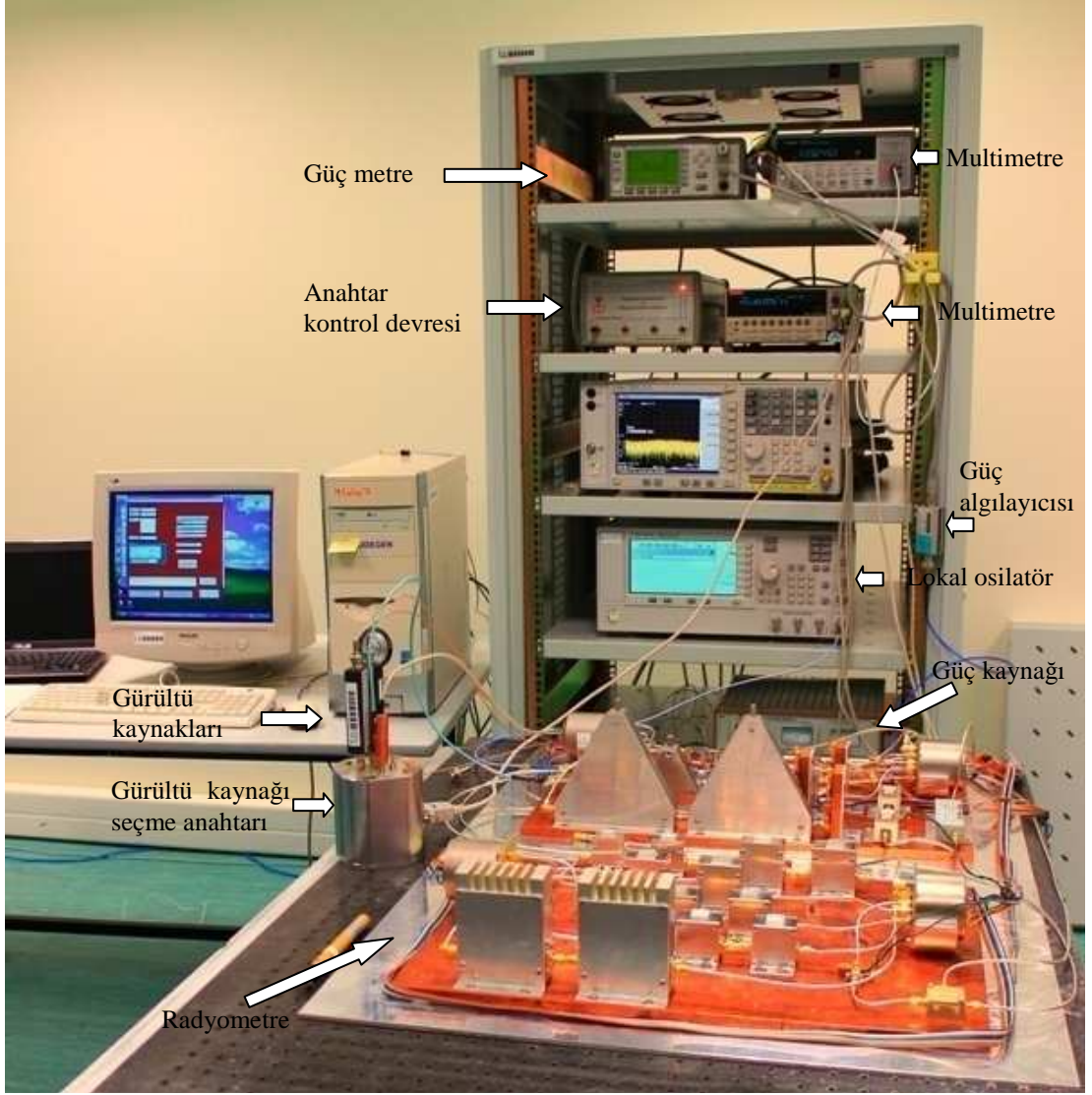
#### 2.2.4. Radyometre

Mikrodalga anahtar üzerinden Şekil 2.25’de verilen radyometre girişine ortam gürültü kaynağı çıkışı uygulandığında, radyometre çıkışındaki güç  $P_a$ , girişe standart

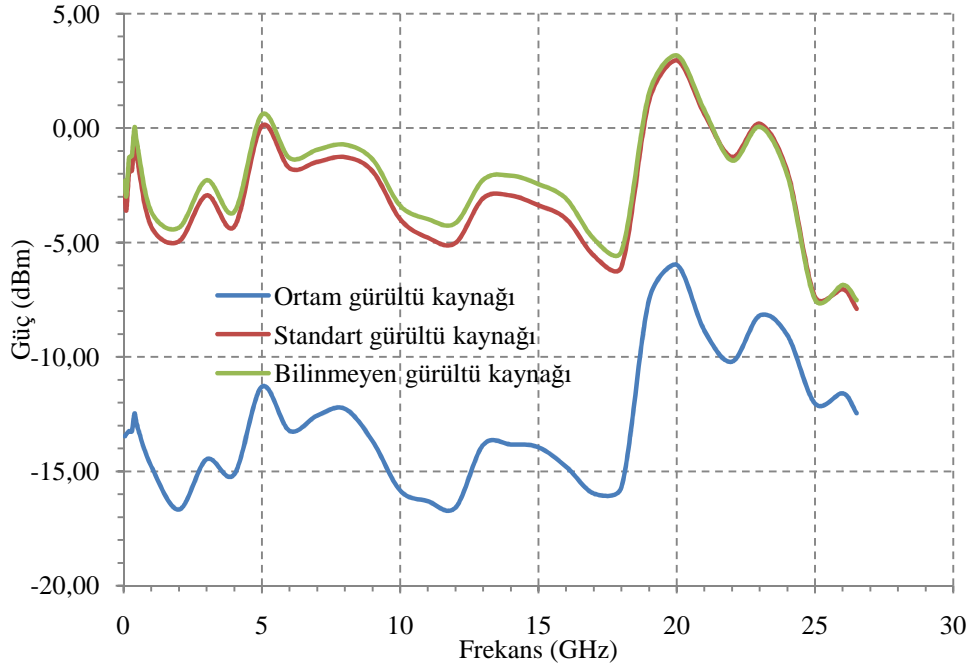
gürültü kaynağı uygulandığında  $P_s$  ve bilinmeyen gürültü kaynağı uygulandığında  $P_x$  olarak okunur. Elde edilen bu güç değerleri standart Y-katsayısı ( $P_s/P_a$ ) ve bilinmeyen Y-katsayısı ( $P_x/P_a$ ) hesaplamasında kullanılır. Gerçekleştirilen ölçümde elde edilen ortalama güç değerleri Şekil 2.26'da ve standart sapma değerleri Şekil 2.27'de verilmiştir.



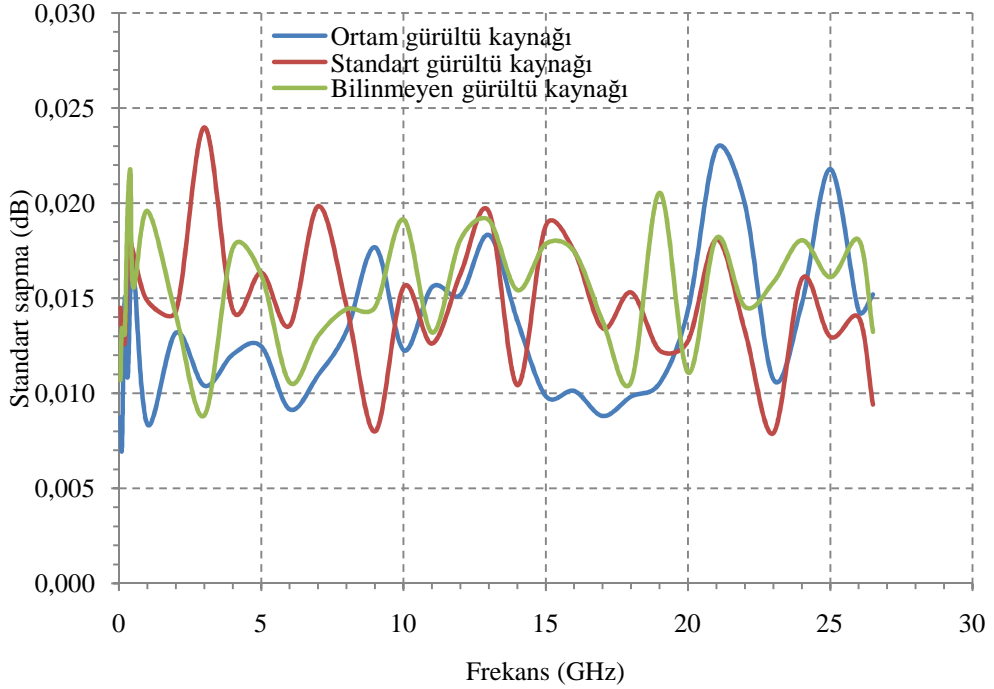
Şekil 2.24. Anahtar etkinlikleri ve uyumsuzluk katsayıları



Şekil 2.25. Toplam güç radyometre fotoğrafı



Şekil 2.26. Radyometre girişine gürültü kaynakları bağlı iken, radyometre çıkış güçleri



Şekil 2.27. Radyometre girişine gürültü kaynakları bağlı iken, radyometre çıkış güçlerinin standart sapması

### 2.2.5. Bilinmeyen gürültü kaynağı

Bilinmeyen gürültü kaynağı olarak NC346C model bir gürültü kaynağı kullanılmıştır. Gürültü kaynağının ölçümleri İngiltere Fizik Laboratuvarı (NPL), RF

ve Mikrodalga Laboratuvarı'nın Mikrodalga Gürültü Birimi'nde yapılarak sertifikalandırılmıştır. Bu sertifikada verilen değer, gerçek değer olarak kabul edilmiş ve yapılan ölçümlerle kıyaslanmıştır. Gürültü kaynağına ait gerçek değerler Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Bilinmeyen gürültü kaynağı sertifika değerleri

| Frekans<br>(GHz) | Sıcaklık<br>(K) | Belirsizlik<br>(k=2)<br>(K) | Yansımaya<br>katsayısı<br>( $\Gamma$ ) | Frekans<br>(GHz) | Sıcaklık<br>(K) | Belirsizlik<br>(k=2)<br>(K) | Yansımaya<br>katsayısı<br>( $\Gamma$ ) |
|------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| 0,01             | 15390           | 270                         | 0,023                                  | 12               | 11340           | 270                         | 0,054                                  |
| 0,03             | 9150            | 240                         | 0,025                                  | 13               | 13590           | 220                         | 0,063                                  |
| 0,06             | 9190            | 160                         | 0,025                                  | 14               | 14110           | 340                         | 0,074                                  |
| 0,1              | 9270            | 160                         | 0,025                                  | 15               | 13790           | 250                         | 0,052                                  |
| 0,3              | 9130            | 130                         | 0,024                                  | 16               | 14510           | 290                         | 0,046                                  |
| 0,6              | 8980            | 130                         | 0,021                                  | 17               | 13860           | 260                         | 0,073                                  |
| 1                | 8740            | 130                         | 0,018                                  | 18               | 12410           | 350                         | 0,075                                  |
| 2                | 8230            | 120                         | 0,034                                  | 19               | 11610           | 410                         | 0,054                                  |
| 3                | 7640            | 120                         | 0,045                                  | 20               | 12680           | 390                         | 0,072                                  |
| 4                | 7530            | 120                         | 0,026                                  | 21               | 12820           | 500                         | 0,083                                  |
| 5                | 7920            | 170                         | 0,014                                  | 22               | 10570           | 300                         | 0,053                                  |
| 6                | 8000            | 130                         | 0,052                                  | 23               | 9620            | 260                         | 0,051                                  |
| 7                | 7720            | 130                         | 0,067                                  | 24               | 9630            | 450                         | 0,07                                   |
| 8                | 8270            | 140                         | 0,05                                   | 25               | 8410            | 390                         | 0,056                                  |
| 9                | 9990            | 160                         | 0,046                                  | 26               | 7290            | 370                         | 0,034                                  |
| 10               | 10960           | 170                         | 0,085                                  | 26,5             | 7000            | 420                         | 0,038                                  |
| 11               | 10570           | 160                         | 0,083                                  | -                | -               | -                           | -                                      |

Bilinmeyen gürültü kaynağına ait gürültü sıcaklığını hesaplamak için Eşitlik (2.7) kullanılmıştır. Elde edilen bu değere ait belirsizlik değeri aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak hesaplanmıştır [81].

$$U(T_x) = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial T_x}{\partial X_n} \right)^2} u^2(X_n) \quad (2.13)$$

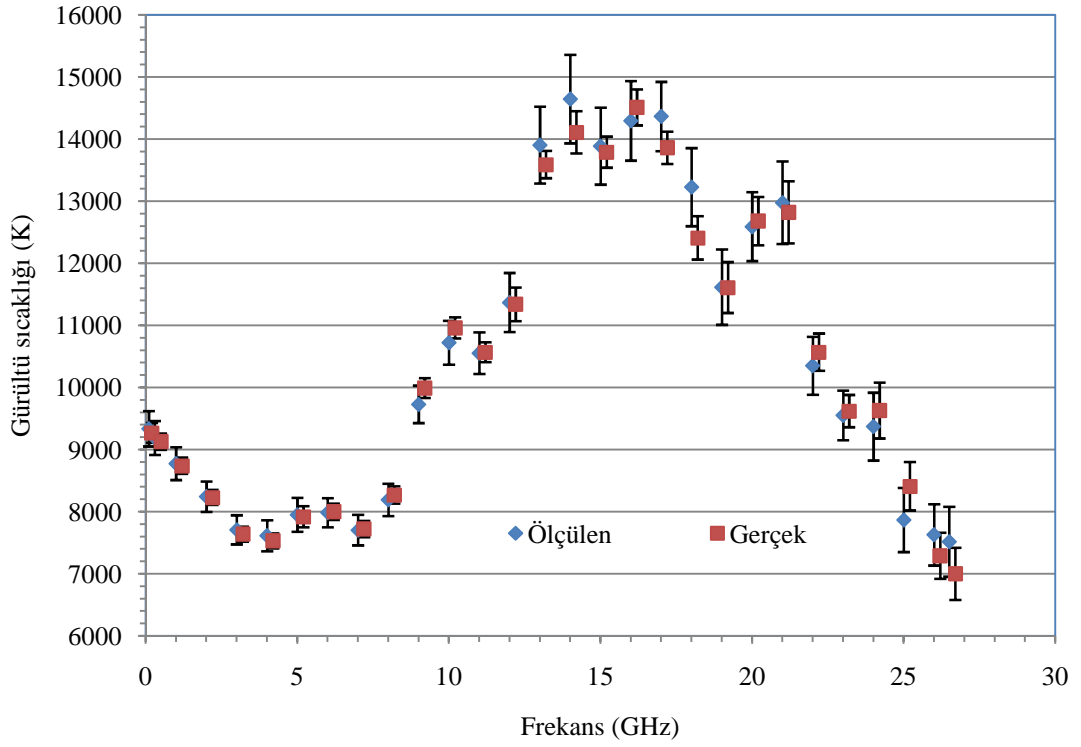
Burada,  $n$ , Eşitlik (2.7)'deki parametre numarası,  $X_n$ ,  $n$ . parametre,  $\frac{\partial T_x}{\partial X_n}$ , duyarlılık katsayısı ve  $u(X_n)$  ise,  $X_n$  parametresinin belirsizliğidir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5. Bilinmeyen gürültü kaynağının ölçüm sonuçları ile hesaplanan gürültü sıcaklığı değerleri

| Frekans<br>(GHz) | Gürültü sıcaklığı<br>(K) | Gürültü sıcaklığı belirsizliği (k=2)<br>(K) | Frekans<br>(GHz) | Gürültü sıcaklığı<br>(K) | Gürültü sıcaklığı belirsizliği (k=2)<br>(K) |
|------------------|--------------------------|---------------------------------------------|------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
| 0,1              | 9335                     | 285                                         | 14               | 14645                    | 713                                         |
| 0,3              | 9187                     | 272                                         | 15               | 13887                    | 619                                         |
| 1                | 8774                     | 265                                         | 16               | 14294                    | 640                                         |
| 2                | 8241                     | 244                                         | 17               | 14364                    | 557                                         |
| 3                | 7708                     | 234                                         | 18               | 13226                    | 629                                         |
| 4                | 7612                     | 249                                         | 19               | 11616                    | 608                                         |
| 5                | 7950                     | 272                                         | 20               | 12590                    | 555                                         |
| 6                | 7984                     | 234                                         | 21               | 12976                    | 665                                         |
| 7                | 7703                     | 246                                         | 22               | 10349                    | 466                                         |
| 8                | 8190                     | 260                                         | 23               | 9551                     | 400                                         |
| 9                | 9728                     | 302                                         | 24               | 9371                     | 546                                         |
| 10               | 10720                    | 353                                         | 25               | 7867                     | 517                                         |
| 11               | 10554                    | 334                                         | 26               | 7628                     | 494                                         |
| 12               | 11369                    | 475                                         | 26,5             | 7515                     | 563                                         |
| 13               | 13903                    | 619                                         | -                | -                        | -                                           |

Tablo 2.5’de verilen frekans noktaları, kurulumu gerçekleştirilen radyometre frekansları ile tam olarak uyumlu değildir. Bunun sebebi, 50 MHz, 200 MHz, 400 MHz ve 500 MHz frekans değerlerinde STD gürültü kaynağı gerçek değerlerinin olmayışıdır. Bu nedenle, toplam güç radyometrenin tüm ölçüm ve karakterizasyonları her frekans noktasında yapılmasına rağmen söz konusu dört nokta için gerçek değerler ile kıyaslama yapılamamıştır.

Bilinmeyen gürültü kaynağına ait hesaplanan gürültü sıcaklığı ve belirsizliği ile gerçek gürültü sıcaklığı ve belirsizliği Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28. Bilinmeyen gürültü kaynağı gürültü sıcaklığı

Şekil 2.28’de gösterildiği gibi ölçülen gürültü sıcaklığı 7515 K ile 14645 K aralığında ve genişletilmiş belirsizliği ise 234 K ile 713 K aralığında değişmektedir. Ölçülen gürültü sıcaklığı ile gerçek değer arasındaki en büyük fark 18 GHz’de olup 816 K’dir. Bu frekansta ölçülen değer genişletilmiş belirsizliği 629 K ve gerçek değer genişletilmiş belirsizliği 350 K’dir. Dolayısı ile her iki değer arasındaki fark, iki ölçüme ait belirsizlik sınırlarının kapsadığı bölge içerisinde kalmaktadır. Dolayısı ile, bilinmeyen gürültü kaynağına ait Şekil 2.28’de verilen gerçek ve ölçülen gürültü sıcaklığı değerlerinin birbirleri ile genişletilmiş belirsizlik sınırları içinde örtüşükleri ve uyum içinde olduğu görülmektedir.

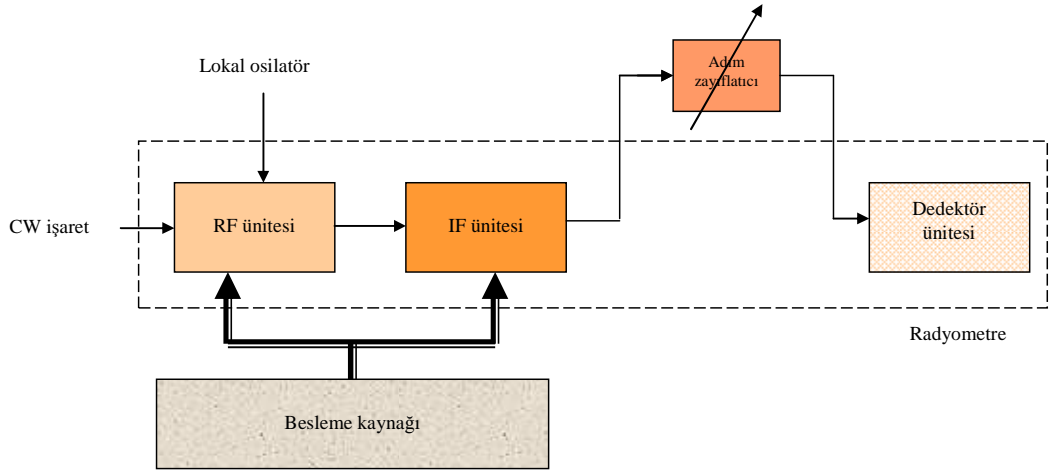


### 3. RADYOMETRE KULLANARAK DÜŞÜK GÜÇ ÖLÇME YÖNTEMİ

İzlenebilirlik, bir ölçme büyüklüğünün ölçme sistemi içerisindeki tüm silsile boyunca SI birimlerine ilişkilendirilebilme yeteneğini ifade eder. Mikrodalga güç ölçümlerinde izlenebilirlik mikrok calorimetre adı verilen sistemlerde güç algılayıcılarının karakterizasyonu yapılarak gerçekleştirilir. Mikrok calorimetrede kullanılan güç seviyesi 10 dBm olup, güç algılayıcı cihazlarının doğrusallık değeri kullanılarak diğer güç seviyelerine izlenebilirlik aktarılmaktadır. Ancak, güç algılayıcılarının çalışma bölgeleri sınırlı olduğundan bu cihazların pratik olarak ölçebildikleri en düşük güç seviyesi -70 dBm'dir. Bu güç değerinin altındaki güçler, çoğunlukla ölçme sistem ya da devrelerinin kendi içerisinde üretilen gürültü işareti içerisinde kaybolmaktadır.

Değeri -70 dBm'in altındaki mikrodalga güç ölçümlerinde izlenebilir bir yöntem oluşturmak için, mikrodalga gürültü ölçümleri için kullanılan radyometrenin ölçme sistemi olarak kullanılması planlanmıştır. Radyometre, diğer sistemlerle karşılaştırıldığında düşük seviyelerde gürültü üretme potansiyeline sahiptir. Ayrıca radyometrenin oldukça yüksek kazanç sağlayan yapısı da bir avantaj olarak değerlendirilmiştir.

CW işareti, gürültü işareti gibi geniş bir frekans bandında olmayıp çok dar bantlı bir işarettir. Bu nedenle gürültü ölçme yöntemi kullanılarak CW işaret ölçülemez. Benzer şekilde gürültü de CW güç ile benzer yöntemler ile ölçülemez. Bu nedenle radyometre, gürültü ölçümünde kullanıldığı gibi kullanılamaz. Toplam güç radyometresinin güç ölçümlerinde kullanılması için Şekil 2.5'de verilen radyometre üzerinde Şekil 3.1'deki gibi değişiklik planlanmıştır.

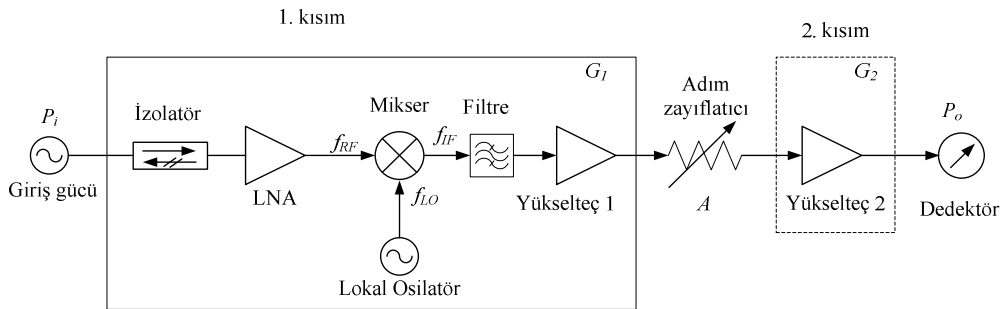


Şekil 3.1. Toplam güç radyometre ile CW güç ölçme

Şekil 2.5’de verilen radyometre girişinde bulunan ortam, standart ve değeri bilinmeyen gürültü kaynaklarının bağlı olduğu anahtar kısmı sistemden uzaklaştırılmıştır. Çünkü, CW işaret ölçümünde ölçülecek olan işaretin radyometreye uygulanacağı tek bir giriş yeterlidir. Ölçüm sistemine izlenebilirliği aktarmakta kullanmak üzere IF ünitesine, SI birimlerine izlenebilir ve değeri değiştirilebilen bir adım zayıflatıcı ilave edilmiştir. Genelde geniş bir güç aralığında mikrodalga güç ölçümleri gerçekleştirilirken önemli hata kaynaklarından bir tanesi dedektör doğrusallığıdır. Dedektör doğrusallığından kaynaklı hatayı en aza indirmek için yine adım zayıflatıcıdan yararlanılması hedeflenmiştir.

### 3.1. Düşük Güç Ölçmek için Radyometrede Yapılan Değişiklikler

Şekil 3.1’de verilen temel yaklaşım modeli göz önüne alınarak radyometrenin CW güç ölçümlerinde kullanılması için yapılan değişikliğin model çizimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Radyometrenin CW güç ölçümleri için düzenlenmesi

Şekil 3.2’de verilen devre modelinde dedektörden okunan güç,

$$P_o = P_i G_1 A G_2 \quad (3.1)$$

Burada,

$P_i$ : Sisteme uygulanan giriş gücü,

$G_1$ : Radyometre birinci kısmının kazancı,

$A$ : Adım zayıflatıcının lineer zayıflatma değeri,

$G_2$ : Radyometre ikinci kısmının kazancı’dır.

Mikrok calorimetrede 10 dBm’de elde edilen güçten düşük güce izlenebilirlik aktarmak için kullanılan bu sistemin, sistem içerisinde kullanılan yükselteçler nedeni ile sınırlı çalışma bölgesi vardır. Ölçme bölgesinin üst sınırı, güç algılayıcılarının ölçebildiği en düşük güç seviyesi olarak belirlenmiştir. Bu değer -70 dBm olup, düşük güç ölçümünde referans olarak kabul edilmiş ve işaret kaynağının bu noktadaki çıkış gücü, güç algılayıcısı ( $P_{ref}$ ) ve radyometre ile yapılan ölçümlerin ortak noktası olarak alınmıştır. Bu nedenle, -70 dBm’de ölçülen güç “referans” olarak isimlendirilmiş ve daha düşük güç değerlerine geçiş için bir adım olarak değerlendirilmiştir. İşaret kaynağının referans güç değerine karşılık dedektörde okunan çıkış gücü ( $P_{o\_ref}$ ),

$$P_{o\_ref} = P_{ref} G_1 A_{ref} G_2 \quad (3.2)$$

şeklindedir. Burada,  $A_{ref}$ : Adım zayıflatıcının lineer zayıflatma değeridir.

Referans güç değerinin ölçümünden sonra, işaret kaynağı gücü bir alt güç değerine ayarlandığında dedektörden okunan güç değeri de azalır. Bu durum dedektör kaynaklı doğrusallık hatası oluşturabileceğinden, dedektör gücü sabit tutulmalıdır. Bu nedenle adım zayıflatıcının değeri azaltılan işaret kaynağı gücü kadar azaltılır. Bu durumda dedektör gücü ( $P_1$ ),

$$P_1 = P_{x1} G_1 A_1 G_2 \quad (3.3)$$

şeklindedir. Burada,

$P_{x1}$ : İşaret kaynağının değeri bilinmeyen çıkış gücü,  
 $A_1$ : Standart zayıflatıcının azaltılmış zayıflatma değeridir.

İşaret kaynağının azaltılmış gücünü hesaplamak için ölçülen iki gücün oranı kullanılır.

$$\frac{P_1}{P_{o\_ref}} = \frac{P_{x1} G_1 A_1 G_2}{P_{ref} G_1 A_{ref} G_2} \quad (3.4)$$

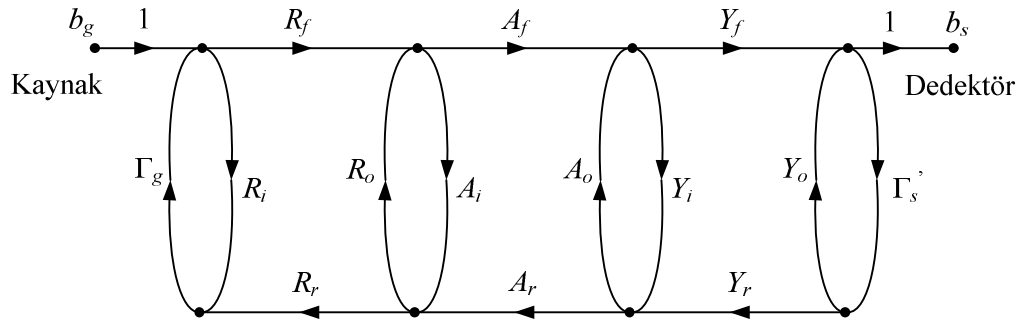
Burada, gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra işaret kaynağının bilinmeyen çıkış gücü ( $P_{x1}$ ),

$$P_{x1} = \frac{P_1 A_{ref}}{P_{o\_ref} A_1} P_{ref} \quad (3.5)$$

ifadesi ile hesaplanır.

### 3.2. Düşük Güç Ölçme Sistemi Hata Modeli

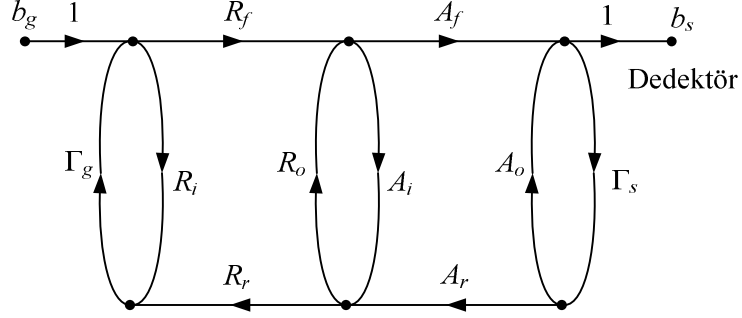
Düşük güç ölçmek amacı ile Şekil 3.2’de verilen sistemde oluşan hataları analiz etmek için işaret akış grafları kullanılarak, Şekil 3.3’de verilen hata modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.3. Sistemin hata modeli

Şekil 3.3’de  $\Gamma_g$  kaynak yansıma katsayısını,  $R_x$ , ( $x: f, o, r, i$ ) ile gösterilen kısım radyometrenin birinci kısmında yer alan tüm malzemelerin s-parametrelerini,  $A_x$ , ( $x: f, o, r, i$ ) adım zayıflatıcının s-parametrelerini,  $Y_x$ , ( $x: f, o, r, i$ ) ikinci kısmın s-parametrelerini ve  $\Gamma'_s$  ise dedektörün giriş yansıma katsayısını temsil etmektedir. Bu modelde kaynak ve adım zayıflatıcı, sırasıyla her frekans ve zayıflatma adımı için

farklı değerler almaktadır. Ancak, ikinci kısım ve dedektör sürekli olarak IF frekansında çalıştığından adım zayıflatıcıdan bağımsız olmaktadır. Dolayısı ile ikinci kısım ve dedektör tek bir parametre ile gösterilebilir. Böylece, Şekil 3.3’de verilen model Şekil 3.4’deki gibi bir adım indirgenebilir.



Şekil 3.4. İndirgenmiş hata modeli

Bu modelin transfer fonksiyonu, Mason’ın işaret akış graf yöntemi [84] ile çözüldüğünde Eşitlik (3.6) elde edilir.

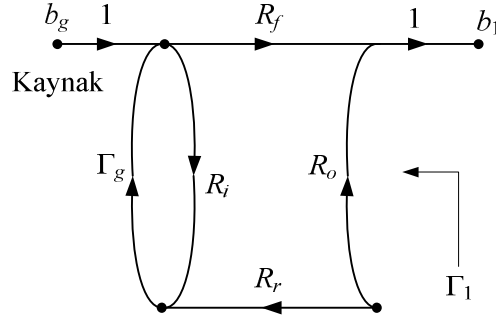
$$\frac{b_s}{b_g} = \left( \frac{R_f A_f (1 - \Gamma_s)}{1 - (\Gamma_g R_i + R_o A_i + A_o \Gamma_s + \frac{1}{R_f A_f \Gamma_s A_r R_r \Gamma_g + R_f A_i R_r \Gamma_g + A_f \Gamma_s A_r R_o} + \Gamma_g R_i R_o A_i A_o \Gamma_s)} \right) \quad (3.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte, giriş gücüne karşılık karakteristik empedansa normalize edilmiş karesel giriş gerilimini hesaplamak için, eşitlikte  $b_g$  ifadesini tek başına bırakıp ifadenin karesini almak gerekir. Bu durumda, Eşitlik (3.6) aşağıdaki gibi olur.

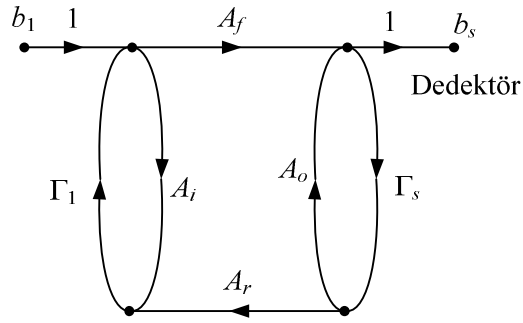
$$b_g^2 = b_s^2 \left( \frac{1 - (\Gamma_g R_i + R_o A_i + A_o \Gamma_s + R_f A_f \Gamma_s A_r R_r \Gamma_g + R_f A_i R_r \Gamma_g)}{R_f A_f (1 - \Gamma_s)} - \frac{A_f \Gamma_s A_r R_o + \Gamma_g R_i R_o A_i A_o \Gamma_s}{R_f A_f (1 - \Gamma_s)} \right)^2 \quad (3.7)$$

Ancak, Eşitlik (3.7)’nin çözümü karmaşık bir ifadeye dönüşmektedir. Yansıma katsayılarının pratikteki değerleri düşünüldüğünde, büyüklüğü küçük olan değerlerin

fazları tamamen belirsizlik içermektedir. Bu nedenle, Eşitlik (3.7)'yi büyüklük ve faz olarak iki kısımda ele almak gerekir. Ancak, böyle bir çözüm kolay elde edilememektedir. Çözüm elde edilse bile, çözümün fazla karmaşık olması nedeni ile pratik olarak kullanımı zordur. Daha pratik bir eşitlik elde etmek için Şekil 3.4, Şekil 3.5'deki gibi iki ayrı kısma bölünerek bu kısımlar ayrı ayrı ele alınmıştır.



a) Kaynak ve radyometre kısmı



b) IF, adım zayıflatıcı ve dedektör kısmı

Şekil 3.5. İndirgenmiş hata modeli kısımları

Şekil 3.5'de verilen iki graf tek başlarına kolay çözülürler. Ayrıca, bu eşitliklerden elde edilen çözümler uygulama için kullanışlıdır.

Şekil 3.5.a'da verilen kısmın transfer fonksiyonu,

$$\frac{b_1}{b_g} = \frac{R_f}{1 - \Gamma_g R_i} \quad (3.8)$$

olarak elde edilir. Burada çıkış gücü,

$$|b_1|^2 = |b_g|^2 \frac{|R_f|^2}{|1 - \Gamma_g R_i|^2} \quad (3.9)$$

olur.  $\Gamma_g$  ve  $R_i$  yansıma katsayıları büyüklük ve faz içerdiğinden ( $\Gamma_g = |\Gamma_g| \cos \theta_g = \rho_g \cos \theta_g$ ) Eşitlik (3.9)'un büyüklük ve faz olarak çözümlenmesi gerekir. Dolayısı ile Eşitlik (3.9),

$$|b_1|^2 = |b_g|^2 \frac{|R_f|^2}{1 + |\Gamma_g|^2 |R_i|^2 - 2|\Gamma_g||R_i| \cos(\theta_{\Gamma_g} + \theta_{R_i})} \quad (3.10)$$

olarak elde edilir. Yansıma katsayısının faz değeri belirsizlik içerdiğinden, faz kısmının değişeceği aralık,  $\cos \theta$ 'nın  $\pm 1$  aralığıdır. Dolayısı ile Eşitlik (3.10) buna göre yeniden düzenlenirse,

$$|b_1|^2 = |b_g|^2 \frac{|R_f|^2}{1 + |\Gamma_g|^2 |R_i|^2 \pm 2|\Gamma_g||R_i|} \quad (3.11)$$

olur.

Şekil 3.5'te çıkışta görünen yansıma katsayısı,

$$\Gamma_1 = R_o + \frac{R_r R_f \Gamma_g}{1 - \Gamma_g R_i} \quad (3.12)$$

şeklinindedir. Radyometrenin geriye doğru iletim katsayısı  $R_r$ , sistemde kullanılan yükselteçlerden dolayı çok küçük olduğundan  $R_r \approx 0$  kabulü yapılabilir. Bu durumda Eşitlik (3.12),

$$\Gamma_1 \cong R_o \quad (3.13)$$

olur.

Şekil 3.5.b'de verilen işaret akış grafinin transfer fonksiyonu,

$$\frac{b_s}{b_1} = \frac{A_f(1-\Gamma_s)}{1 - (\Gamma_1 A_i + \Gamma_s A_o + \Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r) + \Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o} \quad (3.14)$$

şeklindedir. Çıkış gücü,

$$|b_s|^2 = |b_1|^2 \frac{|A_f|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)}{|1 - (\Gamma_1 A_i + \Gamma_s A_o + \Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r) + \Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o|^2} \quad (3.15)$$

olarak elde edilir. Eşitlik (3.15)'in payı sadece büyüklüklerden oluşmaktadır. Ancak payda ifadesinin içerisinde faz içeren yansıma katsayıları vardır. Bu nedenle paydanın çözümlenmesi gerekmektedir. Paydayı çözmek için aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

$$m = |1 - (\Gamma_1 A_i + \Gamma_s A_o + \Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r) + \Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o|^2 \quad (3.16)$$

burada,  $a = \Gamma_1 A_i$ ,  $b = \Gamma_s A_o$ ,  $c = \Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r$  ve  $d = \Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o$  olarak alınırsa

$m = |1 - a - b - c + d|^2$  olur. Bu ifadenin çözümünden,

$$\begin{aligned} m &= 1 + |a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2 - 2|a| - 2|b| - 2|c| + 2|d| + 2|ab| + 2|ac| - 2|ad| \\ &\quad + 2|bc| - 2|bd| - 2|cd| \end{aligned} \quad (3.17)$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (3.17), içerisinde fazların olmadığı ve fazların olduğu iki ifade barındırmaktadır. Fazların olmadığı parametreleri elde etmek için  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ve  $d$  yerlerine yazılırsa,

$$m_1 = 1 + |\Gamma_1|^2 |A_i|^2 + |\Gamma_s|^2 |A_o|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_f|^2 |\Gamma_s|^2 |A_r|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_i|^2 |\Gamma_s|^2 |A_o|^2 \quad (3.18)$$

elde edilir.

Faz içeren parametreler ise,

$$m_2 = 2(-|a| - |b| - |c| + |d| + |ab| + |ac| - |ad| + |bc| - |bd| - |cd|) \quad (3.19)$$



şeklindedir. Bu eşitlikte  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ve  $d$  yerlerine yazılırsa,

$$m_2 = 2 \left( -\underbrace{|\Gamma_1 A_i|}_{a_1} - \underbrace{|\Gamma_s A_o|}_{a_2} - \underbrace{|\Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r|}_{a_3} + \underbrace{|\Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o|}_{a_4} + \underbrace{|\Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o|}_{a_5} + \underbrace{|\Gamma_1 A_i \Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r|}_{a_6} \right. \\ \left. - 2 \left( \underbrace{|\Gamma_1 A_i \Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o|}_{a_7} + \underbrace{|\Gamma_s A_o \Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r|}_{a_8} - \underbrace{|\Gamma_s A_o \Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o|}_{a_9} - \underbrace{|\Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r \Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o|}_{a_{10}} \right) \right) \quad (3.20)$$

olur. Buradan,

$$a_1 = |\Gamma_1 A_i| = |\Gamma_1| |A_i| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_1} + \theta_{A_i}) \\ a_2 = |\Gamma_s A_o| = |\Gamma_s| |A_o| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_s} + \theta_{A_o}) \\ a_3 = |\Gamma_1 A_f \Gamma_s A_r| = |\Gamma_1| |A_f| |\Gamma_s| |A_r| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_1} + \theta_{A_f} + \theta_{\Gamma_s} + \theta_{A_r}) \\ a_4 + a_5 = 2|\Gamma_1 A_i \Gamma_s A_o| = 2|\Gamma_1| |A_i| |\Gamma_s| |A_o| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_1} + \theta_{A_i} + \theta_{\Gamma_s} + \theta_{A_o}) \\ a_6 = |\Gamma_1^2 \Gamma_s A_i A_f A_r| = |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s| |A_i| |A_f| |A_r| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_s} + \theta_{A_i} + \theta_{A_f} + \theta_{A_r}) \\ a_7 = |\Gamma_1^2 A_i^2 \Gamma_s A_o| = |\Gamma_1|^2 |A_i|^2 |\Gamma_s| |A_o| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_s} + \theta_{A_o}) \\ a_8 = |\Gamma_s^2 A_o \Gamma_1 A_f A_r| = |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_o| |A_f| |A_r| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_1} + \theta_{A_o} + \theta_{A_f} + \theta_{A_r}) \\ a_9 = |\Gamma_s^2 A_o^2 \Gamma_1 A_i| = |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_o|^2 |A_i| \text{Cos}(\theta_{\Gamma_1} + \theta_{A_i}) \\ a_{10} = |\Gamma_1^2 A_f \Gamma_s^2 A_r A_i A_o| = |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s|^2 |A_f| |A_r| |A_i| |A_o| \text{Cos}(\theta_{A_f} + \theta_{A_r} + \theta_{A_i} + \theta_{A_o}) \quad (3.21)$$

olarak yazılır. Eşitlik (3.21)'de verilen  $\text{Cos}\theta$ lı ifadelerin tamamının değişim aralığı  $\pm 1$ 'dir. Yansıma katsayılarının fazının bilinmediği kabul edilerek, Eşitlik (3.21) Eşitlik (3.20)'de yerine yazılırsa aşağıda verilen Eşitlik (3.22) elde edilir.

$$m_2 = \pm 2 \left( |\Gamma_1| |A_i| + |\Gamma_s| |A_o| + |\Gamma_1| |A_f| |\Gamma_s| |A_r| + 2|\Gamma_1| |A_i| |\Gamma_s| |A_o| + |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s| |A_i| |A_f| |A_r| \right) \\ \pm 2 \left( |\Gamma_1|^2 |A_i|^2 |\Gamma_s| |A_o| + |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_o| |A_f| |A_r| + |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_o|^2 |A_i| + |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s|^2 |A_f| |A_r| |A_i| |A_o| \right) \quad (3.22)$$

Böylece, Eşitlik (3.16)'da verilen  $m$  eşitliği  $m_1+m_2$  şeklinde çözümlenmiş olur. Burada,  $m_1$  ifadesi  $m$ 'nin sahip olduğu büyüklüğün değerini gösterirken,  $m_2$  ifadesi ise  $m$ 'nin değişim aralığını ifade eder.

### 3.3. Düşük Güç Ölçme Sistemi Parametreleri

Şekil 3.5 ile modellenen düşük güç ölçme sistemi çıkışındaki güç, dedektör ile okunmaktadır. Bu sistem ile belirlenmesi hedeflenen değer giriş gücüdür. Giriş gücünü hesaplayabilmek için Eşitlik (3.11) ve Eşitlik (3.15), Eşitlik (3.16) ve Eşitlik (3.18) kullanılarak yeniden düzenlendiğinde,

$$|b_g|^2 = \frac{1+|\Gamma_g|^2|R_i|^2}{|R_f|^2}|b_1|^2$$

$$|b_1|^2 = \frac{1+|\Gamma_1|^2|A_i|^2+|\Gamma_s|^2|A_o|^2+|\Gamma_1|^2|A_f|^2|\Gamma_s|^2|A_r|^2+|\Gamma_1|^2|A_i|^2|\Gamma_s|^2|A_o|^2}{|A_f|^2(1-|\Gamma_s|^2)}|b_s|^2 \quad (3.23)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik çıkışta okunan dedektör gücü, adım zayıflatıcı ve sistem parametrelerini kullanarak giriş gücünün hesaplanmasını sağlar. Eşitlik (3.23) ile elde edilen giriş gücünün değişim aralığı ise, Eşitlik (3.11), Eşitlik (3.15), Eşitlik (3.16) ve Eşitlik (3.22) kullanılarak düzenlenirse,

$$\Delta|b_g|^2 = \pm \frac{2|\Gamma_g||R_i|}{|R_f|^2}|b_1|^2$$

$$\Delta|b_1|^2 = \pm \frac{2(|\Gamma_1||A_i|+|\Gamma_s||A_o|+|\Gamma_1||A_f||\Gamma_s||A_r|+2|\Gamma_1||A_i||\Gamma_s||A_o|+|\Gamma_1|^2|\Gamma_s||A_i||A_f||A_r|)}{|A_f|^2(1-|\Gamma_s|^2)}|b_s|^2 \quad (3.24)$$

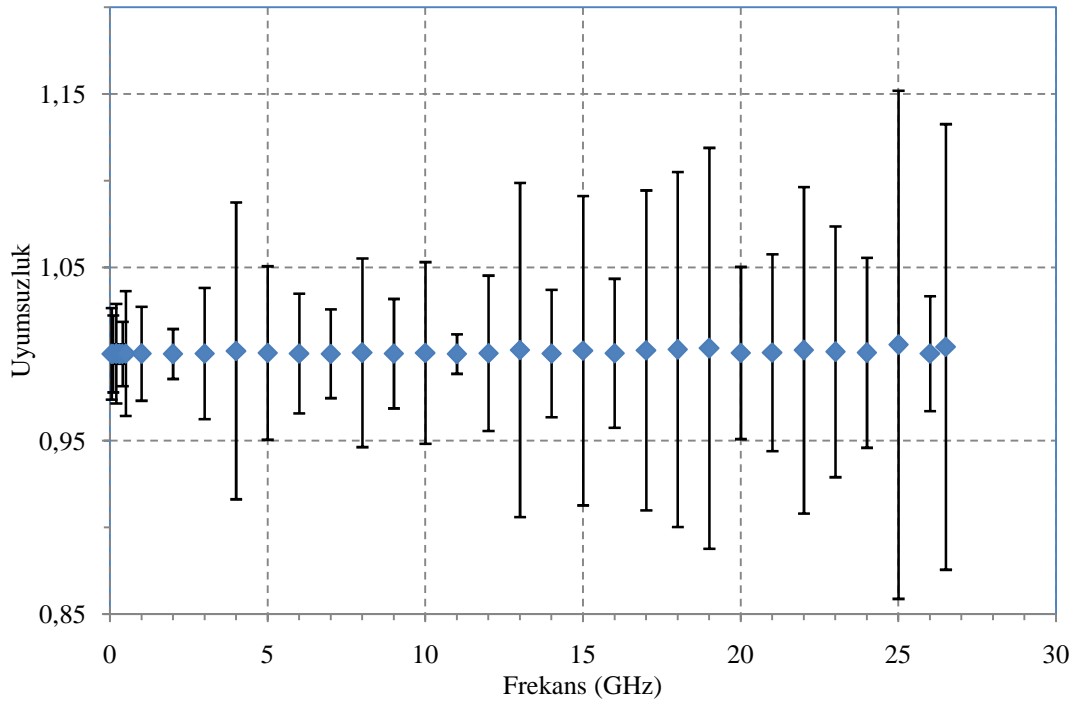
$$\pm \frac{2(|\Gamma_1|^2|A_i|^2|\Gamma_s||A_o|+|\Gamma_s|^2|\Gamma_1||A_o||A_f||A_r|+|\Gamma_s|^2|\Gamma_1||A_o|^2|A_i|+|\Gamma_1|^2|\Gamma_s|^2|A_f||A_r||A_i||A_o|)}{|A_f|^2(1-|\Gamma_s|^2)}|b_s|^2$$

elde edilir.

Eşitlik (3.23) ile sistemin giriş gücü hesap edilirken Eşitlik (3.24) ile empedans uyumsuzluğu nedeni ile oluşan hata belirlenebilmektedir.

Empedans uyumsuzluğu hatası hakkında fikir sahibi olmak için, tasarlanan sistem parametrelerinin bir kısmı ölçülmüş ve radyometre kazancı nominal alınmıştır. DUT olarak, Agilent Technologies marka E8257C model bir işaret kaynağı kullanılmıştır. Bu işaret kaynağının üretici firma tarafından verilen duran dalga oranı (SWR) değerleri ve radyometrenin ölçülen giriş yansımaya katsayısı değerleri Eşitlik (3.23) ve (3.24)'de yerine konmuştur. Bu değerler sonucunda hesaplanan düzeltme değerleri

$$\frac{|b_g|^2}{|b_1|^2} |R_f|^2 \text{ ve bu değerlerin değişim aralığı } \frac{\Delta |b_g|^2}{|b_1|^2} |R_f|^2 \text{ Şekil 3.6'da verilmiştir.}$$



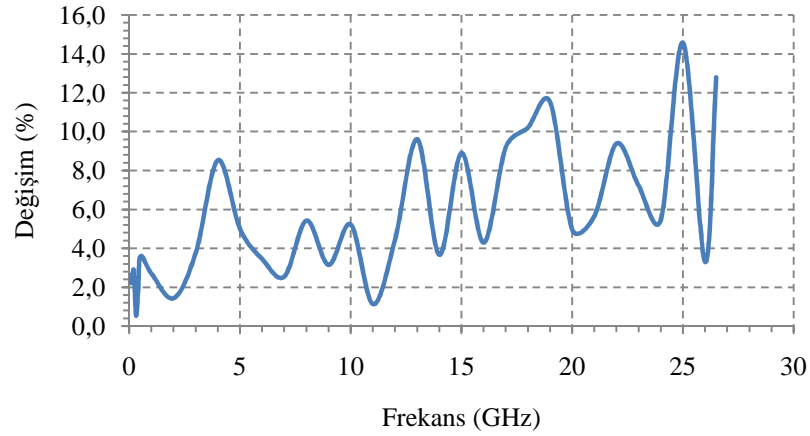
Şekil 3.6. Birinci kısım hata düzeltmesi ve değişim aralığı

Benzer şekilde sistemin ikinci kısmına ait parametreler ve bu parametreler kullanılarak Eşitlik (3.23) ve (3.24) ile elde edilen düzeltme değerleri ve bu değerlerin değişim aralığı Tablo 3.1'de verilmiştir.

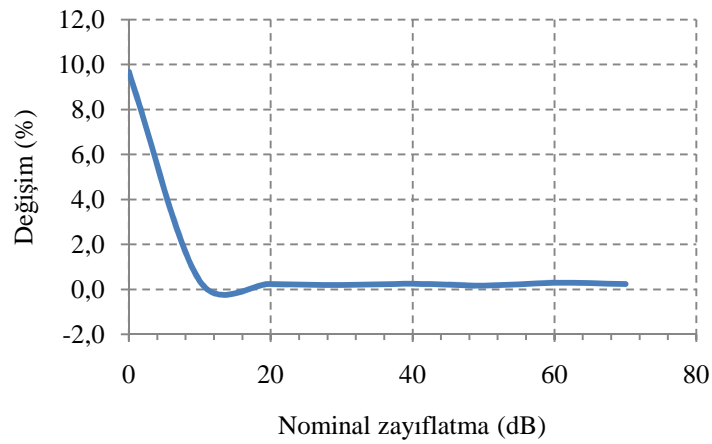
Tablo 3.1. İkinci kısım hata düzeltmesi ve değişim aralığı

| Nominal zayıflatma (dB) | $ \Gamma_1 $ | $ A_i $ | $ A_f $              | $ A_r $              | $ A_o $ | $ \Gamma_s $ | $\frac{ b_1 ^2}{ b_s ^2}$ | $\frac{\Delta b_1 ^2}{ b_s ^2}$ |
|-------------------------|--------------|---------|----------------------|----------------------|---------|--------------|---------------------------|---------------------------------|
| 0                       | 0,1778       | 0,0049  | 0,99501              | 0,99235              | 0,0049  | 0,2627       | 1,087                     | 0,105                           |
| 10                      | 0,1778       | 0,0017  | 0,100354             | 0,100344             | 0,0039  | 0,2627       | 106,657                   | 0,394                           |
| 20                      | 0,1778       | 0,0027  | 0,009535             | 0,009546             | 0,0026  | 0,2627       | $1,18 \cdot 10^4$         | 28,87                           |
| 30                      | 0,1778       | 0,0005  | 0,000976             | 0,00098              | 0,0034  | 0,2627       | $1,13 \cdot 10^6$         | $2,22 \cdot 10^3$               |
| 40                      | 0,1778       | 0,0009  | $9,91 \cdot 10^{-5}$ | $9,92 \cdot 10^{-5}$ | 0,0041  | 0,2627       | $1,09 \cdot 10^8$         | $2,72 \cdot 10^5$               |
| 50                      | 0,1778       | 0,0009  | $9,4 \cdot 10^{-6}$  | $9,44 \cdot 10^{-6}$ | 0,0026  | 0,2627       | $1,22 \cdot 10^{10}$      | $2,06 \cdot 10^7$               |
| 60                      | 0,1778       | 0,0009  | $9,47 \cdot 10^{-7}$ | $9,46 \cdot 10^{-7}$ | 0,0048  | 0,2627       | $1,20 \cdot 10^{12}$      | $3,47 \cdot 10^9$               |
| 70                      | 0,1778       | 0,0009  | $9,81 \cdot 10^{-8}$ | $9,59 \cdot 10^{-8}$ | 0,0039  | 0,2627       | $1,12 \cdot 10^{14}$      | $2,71 \cdot 10^{11}$            |

Şekil 3.6 ve Tablo 3.1’de elde edilen değerlerden  $\Delta b_g/b_g$  ve  $\Delta b_l/b_l$  yüzde olarak hesaplandığında Şekil 3.7’de verilen değerler elde edilmektedir.



a) Birinci kısım



b) İkinci kısım

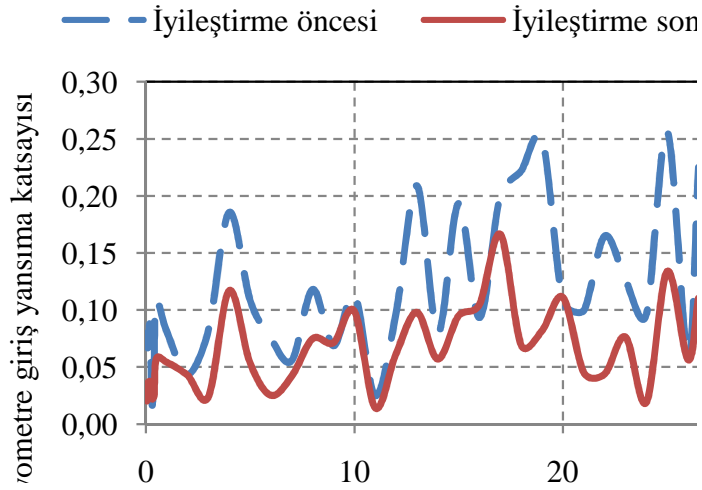
Şekil 3.7. Birinci ve ikinci kısım değişimleri

Şekil 3.7’de verilen değişimler %15’e kadar çıkmaktadır. Bu oran yüksek olarak kabul değerlendirilmiş ve genel olarak belirsizliği büyütme potansiyeline sahip olduğundan sistemin iyileştirilmesi yoluna gidilmiştir.

### 3.4. Düşük Güç Ölçme Sisteminin İyileştirilmesi

Düşük güç ölçme sisteminde  $\Delta b_g/b_g$  ve  $\Delta b_l/b_l$  oranlarını küçültmek için sistemde değişiklik yapmak gerekmektedir. Yapılacak değişikliğe karar vermek için,  $\Delta b_g/b_g$  ve  $\Delta b_l/b_l$  içerisinde değişimi büyüten parametreler incelenmiştir.

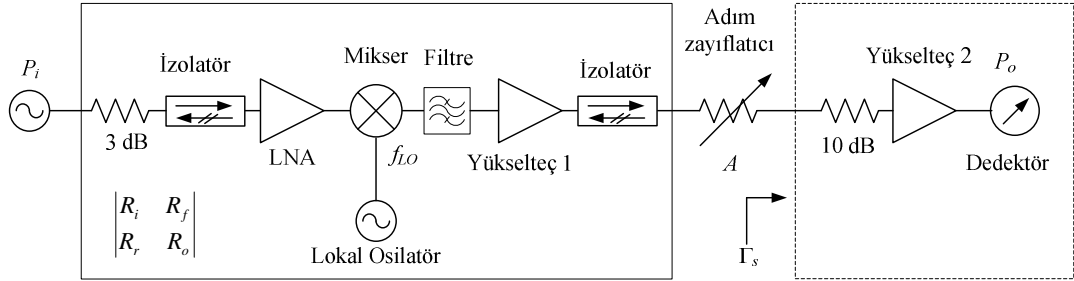
$\Delta b_g/b_g$  parametreleri, radyometre giriş yansımaya katsayısı ve DUT yansımaya katsayısıdır. Değişim içerisinde en baskın parametre olan DUT yansımaya katsayısı için yapılabilecek bir şey olmadığından, radyometre giriş yansımaya katsayısı küçültülmelidir. Bu değeri küçültmek için, radyometre girişine 3 dB değerinde bir sabit zayıflatıcı eklenmiştir. Radyometre girişinde zayıflatıcının olmadığı (iyileştirme öncesi) ve zayıflatıcının olduğu (iyileştirme sonrası) her iki durum için elde edilen yansımaya katsayıları Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Radyometre giriş yansımaya katsayısı

$\Delta b_l/b_l$  değişimini oluşturan parametreler ise radyometre çıkış yansımaya katsayısı ( $\Gamma_1$ ), adım zayıflatıcı ( $A_i$ ) ve dedektör giriş yansımaya katsayısıdır ( $\Gamma_s$ ). Bu parametreler incelendiğinde radyometre çıkış yansımaya katsayısı (radyometre çıkışında kullanılan yükseltecin yansımaya kaybı 15 dB olarak verilmektedir, dolayısı ile yansımaya katsayısı 0,1778’dir) ve dedektör giriş yansımaya katsayısının (0,2627) adım zayıflatıcıya göre

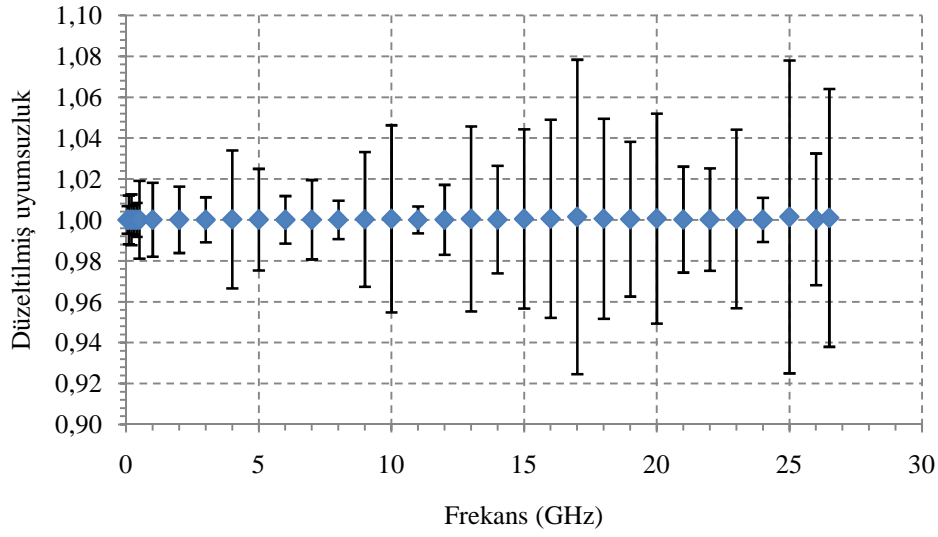
yüksek olduğu belirlenmiştir. Yansıma katsayılarını küçültmek için radyometre çıkışına bir izolatör ve dedektör girişine 10 dB değerinde sabit bir zayıflatıcı bağlanmıştır. Çıkışa izolatör bağlanmasının nedeni, radyometre aktif bir sistem olup çıkışında bir güç vardır. Dolayısı ile çıkış yansıma katsayısı ölçümü yapılmak istendiğinde bu çıkış gücü doğru ölçüme engel olmaktadır. Bu nedenle, bu tarz sistemlerde genellikle, yansıma katsayısı ölçümü yerine üreticinin tanımladığı değerler kullanılmaktadır. Bu durumun getirdiği olumsuzluğu en aza indirmek için geriye doğru zayıflatması yüksek olan izolatör tercih edilmiştir. Bir izolatörün s-parametreleri ölçüm ile belirlenebilmektedir. Çıkışına izolatör bağlanmış bir yükselteç sisteminin izolatör çıkışından görünen yansıma katsayısı  $\Gamma_o = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_y}{(1 - S_{11}\Gamma_y)}$  ifadesi ile hesaplanmıştır ( $S_{xx}$ , izolatör s-parametreleri,  $\Gamma_y$ , yükselteç çıkışının yansıma katsayısıdır). Bu hesaplama sonucu radyometre çıkış yansıma katsayısı 0,0566 olarak elde edilmiştir. Dedektör girişine bağlanan sabit zayıflatıcı ile dedektörün giriş yansıma katsayısı  $< 0,1$  olmuştur. Sisteme yapılan bu eklemelerden sonra elde edilen iyileştirilmiş sistem Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. İyileştirilmiş sistem

Radyometre girişine 3 dB sabit zayıflatıcı ve çıkışına izolatör dahil edilerek radyometre sisteminin giriş ve çıkış yansıma katsayıları, 3 dB zayıflatıcı girişinden (Şekil 3.8) ölçülmüş ve izolatör çıkışından hesaplanmıştır. Dedektör girişine eklenen 10 dB sabit zayıflatıcıda yine dedektör içerisinde değerlendirilmiş ve dedektör yansıma katsayısı 10 dB sabit zayıflatıcı girişi olarak ölçülmüştür.

Yapılan değişikliklerden sonra elde edilen yeni yansıma katsayıları ve bunlarla hesaplanan değerler ve değişimler Şekil 3.10 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.10. Birinci kısım hata düzeltmesi ve değişim aralığı

Tablo 3.2. İyileştirilmiş sistemin ikinci kısım hata düzeltmesi ve değişim aralığı

| Nominal zayıflatma<br>(dB) | $ \Gamma_1 $ | $ A_i $ | $ A_f $              | $ A_r $              | $ A_o $ | $ \Gamma_s $ | $\frac{ b_1 ^2}{ b_s ^2}$ | $\frac{\Delta b_1 ^2}{ b_s ^2}$ |
|----------------------------|--------------|---------|----------------------|----------------------|---------|--------------|---------------------------|---------------------------------|
| 0                          | 0,0566       | 0,0049  | 0,99501              | 0,99235              | 0,0049  | 0,10         | 1,020                     | 0,013                           |
| 10                         | 0,0566       | 0,0017  | 0,100354             | 0,100344             | 0,0039  | 0,10         | 100,298                   | 0,110                           |
| 20                         | 0,0566       | 0,0027  | 0,009535             | 0,009546             | 0,0026  | 0,10         | $1,1 \cdot 10^4$          | 9,17                            |
| 30                         | 0,0566       | 0,0005  | 0,000976             | 0,00098              | 0,0034  | 0,10         | $1,06 \cdot 10^6$         | $7,76 \cdot 10^2$               |
| 40                         | 0,0566       | 0,0009  | $9,91 \cdot 10^{-5}$ | $9,92 \cdot 10^{-5}$ | 0,0041  | 0,10         | $1,03 \cdot 10^8$         | $9,39 \cdot 10^4$               |
| 50                         | 0,0566       | 0,0009  | $9,4 \cdot 10^{-6}$  | $9,44 \cdot 10^{-6}$ | 0,0026  | 0,10         | $1,14 \cdot 10^{10}$      | $6,99 \cdot 10^6$               |
| 60                         | 0,0566       | 0,0009  | $9,47 \cdot 10^{-7}$ | $9,46 \cdot 10^{-7}$ | 0,0048  | 0,10         | $1,13 \cdot 10^{12}$      | $1,20 \cdot 10^9$               |
| 70                         | 0,0566       | 0,0009  | $9,81 \cdot 10^{-8}$ | $9,59 \cdot 10^{-8}$ | 0,0039  | 0,10         | $1,05 \cdot 10^{14}$      | $9,35 \cdot 10^{10}$            |

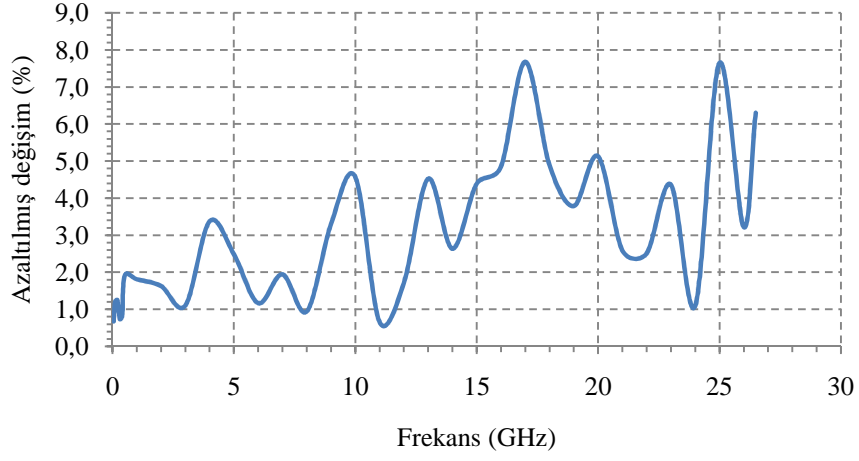
Şekil 3.10 ve Tablo 3.2’de elde edilen değerler ve değişimlerden  $\Delta b_g/b_g$  ve  $\Delta b_1/b_1$  yüzde olarak hesaplandığında Şekil 3.11’de verilen değerler elde edilmiştir.

Şekil 3.7’de %15’e kadar çıkan değişimler, Şekil 3.11’de en fazla %8’e kadar çıkmaktadır. Bu da sistemin önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermektedir.

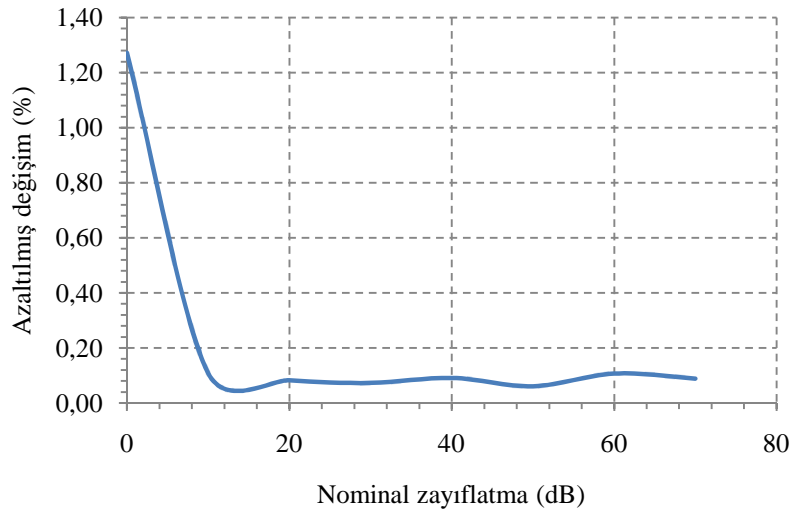
### 3.5. Sistemin Kazanç Doğrusallığı

Ölçme sisteminin girişinde her bir frekans için farklı güç seviyeleri vardır. Farklı güç seviyeleri yükseltilirken, her gücün aynı yükseltme oranına maruz kalması sistem

doğrusallığının bir sonucudur. Sistem doğrusallığını test etmek için Şekil 3.12'de verilen test düzeneği kurulmuştur.



a) Birinci kısım



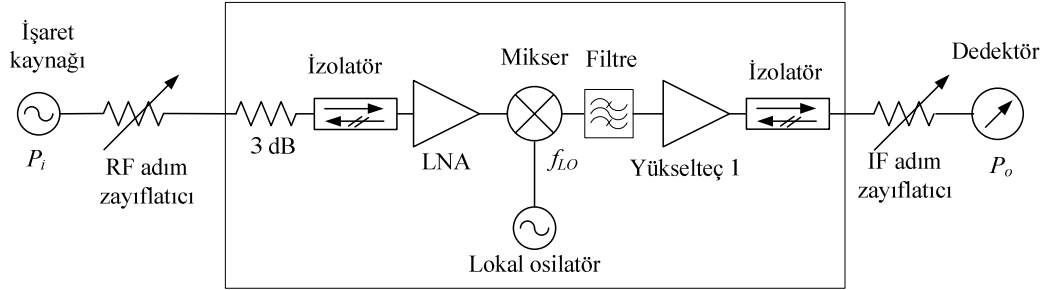
b) İkinci kısım

Şekil 3.11. İyileştirilmiş sistemin birinci ve ikinci kısım değişimleri





a)



b)

Şekil 3.12. Sistemin doğrusallık test düzeneği a) fotoğrafı, b) blok şeması

Girişte bulunan işaret kaynağı gücü  $-60$  dBm'de sabit tutulmuştur. İşaret kaynağı çıkışında yer alan RF adım zayıflatıcı, radyometre giriş gücünü oluşturmak üzere  $0$  dB'den başlamak üzere  $10$  dB adımlar ile arttırılarak  $60$  dB'ye kadar ayarlanmış ve radyometreye  $-60$  dBm ile  $-120$  dBm arasında güç uygulanması sağlanmıştır. Radyometre tarafından yükseltilecek güç, çıkıştaki IF adım zayıflatıcı üzerinden dedektör olarak kullanılan spektrum analizör girişine uygulanmıştır. Spektrum analizör'den kaynaklanabilecek doğrusallık hatalarını bertaraf etmek için dedektör girişinde adım zayıflatıcı kullanılmıştır. IF adım zayıflatıcı, radyometre girişinde  $-60$  dBm güç varken  $60$  dB'ye ayarlanmış ve radyometre giriş gücü  $10$  dB düşürüldükçe IF adım zayıflatıcı değeri de bu güce paralel olarak  $10$  dB azaltılmış ve  $-120$  dBm giriş gücünde değeri  $0$  dB olarak ayarlanmıştır. Böylece dedektör giriş gücü sabit tutulmuştur. Giriş gücü, RF adım zayıflatıcı değeri, IF adım zayıflatıcı değeri ve dedektörden okunan güç değerleri kullanılarak radyometre kazancı

hesaplanmıştır. -60 dBm giriş gücüne karşılık elde edilen radyometre kazancı referans alınarak, diğer güç değerlerinin referans değerden farkları alınmış ve radyometreye ait doğrusallık değerleri her bir güç değeri için hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen ölçümler ve yapılan hesaplamalara örnek olarak 10 GHz frekansındaki değerler Tablo 3.3’de verilmiştir.

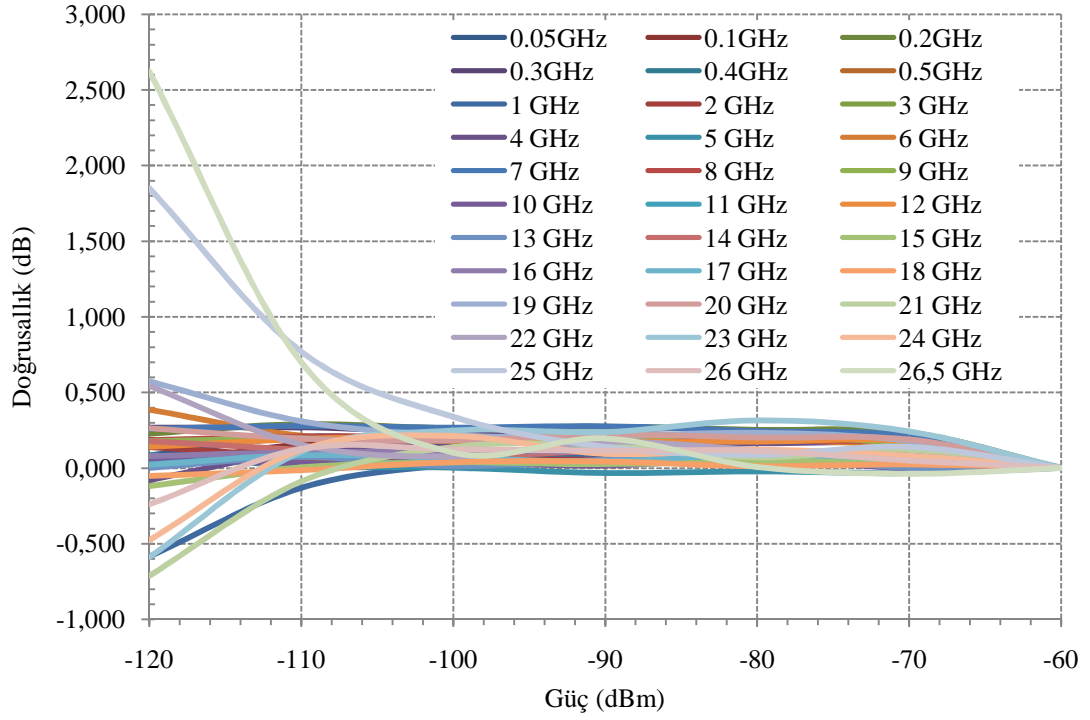
Tablo 3.3. 10 GHz için doğrusallık ölçümleri

| Nominal kaynak gücü<br>$P_i$<br>(dBm) | RF adım zayıflatıcı<br>$A_{RF}$<br>(dB) | IF adım zayıflatıcı<br>$A_{IF}$<br>(dB) | Dedektörden okunan güç<br>$P_o$<br>(dBm) | Radyometre kazancı<br>$R_f = P_o + A_{RF} + A_{IF} - P_i$<br>(dB) | Doğrusallık<br>(dB) |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| -60                                   | 0,741                                   | 60,405                                  | -61,013                                  | 60,133                                                            | referans            |
| -60                                   | 10,747                                  | 50,182                                  | -60,798                                  | 60,131                                                            | -0,002              |
| -60                                   | 20,979                                  | 40,255                                  | -61,047                                  | 60,187                                                            | 0,053               |
| -60                                   | 30,912                                  | 30,192                                  | -60,954                                  | 60,150                                                            | 0,017               |
| -60                                   | 40,899                                  | 20,248                                  | -60,979                                  | 60,168                                                            | 0,035               |
| -60                                   | 51,141                                  | 9,990                                   | -60,966                                  | 60,165                                                            | 0,032               |
| -60                                   | 61,154                                  | 0,029                                   | -60,990                                  | 60,193                                                            | 0,060               |

Tüm frekanslar için ölçümler gerçekleştirilip doğrusallık değerleri hesaplandığında 500 MHz ve daha küçük frekanslardaki doğrusallık değerlerinin Tablo 3.4’de verildiği gibi yüksek olduğu görülmüştür. Sebep analizi yapıldığında, doğrusallık hatasının bu frekanslarda radyometre girişine uygulanan güç değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı ve bu kısımda kullanılan LNA’nın doyuma yakın çalışmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Giriş güc değerini azaltmak için düşük frekans seçme anahtarı (S4) girişine 6 dB değerinde sabit bir zayıflatıcı eklenmiştir. Bu zayıflatıcı eklendikten sonra yeniden ölçümler gerçekleştirilmiş ve tüm frekanslar için elde edilen sonuçlar Şekil 3.13’de verilmiştir.

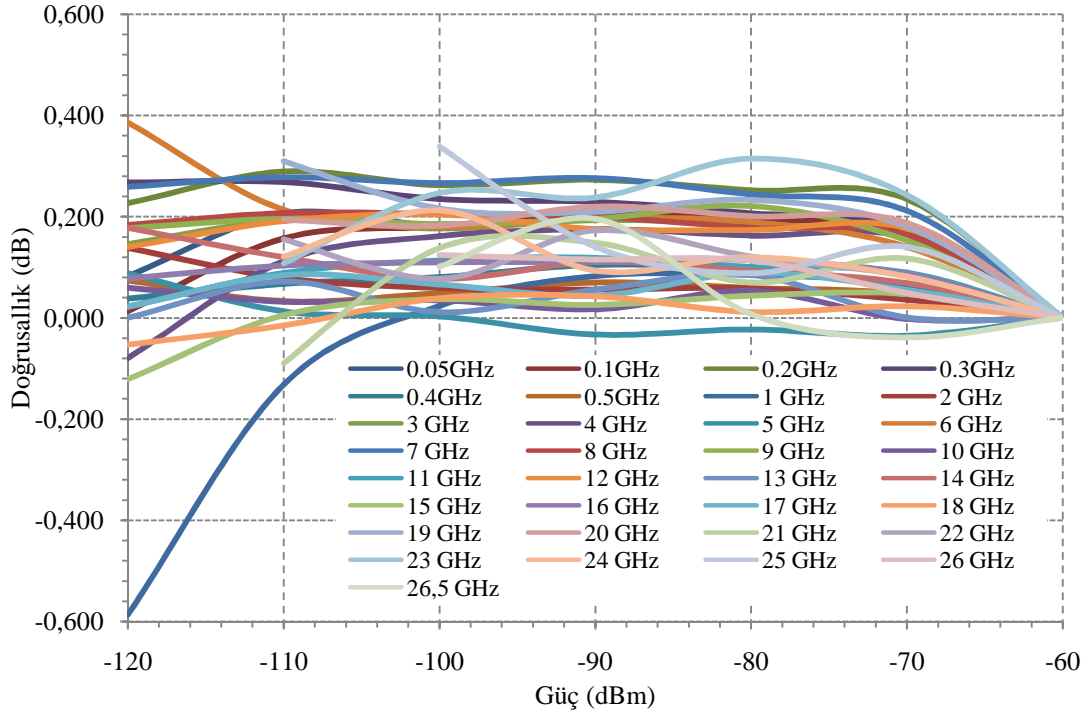
Tablo 3.4. -60 dBm ile -120 dBm aralığındaki giriş güçlerinde 50 MHz -500 MHz frekans aralığı için radyometre doğrusallık değerleri

| Nominal güç<br>(dBm) | 0,05GHz<br>(dB) | 0,1GHz<br>(dB) | 0,2GHz<br>(dB) | 0,3GHz<br>(dB) | 0,4GHz<br>(dB) | 0,5GHz<br>(dB) |
|----------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| -60                  | 0,000           | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          |
| -70                  | 1,761           | 1,317          | 1,244          | 0,713          | 0,277          | 0,212          |
| -80                  | 1,825           | 1,390          | 1,458          | 0,833          | 0,305          | 0,236          |
| -90                  | 1,844           | 1,413          | 1,489          | 0,865          | 0,317          | 0,246          |
| -100                 | 1,832           | 1,396          | 1,481          | 0,858          | 0,302          | 0,240          |
| -110                 | 1,837           | 1,401          | 1,479          | 0,869          | 0,306          | 0,239          |
| -120                 | 1,781           | 1,369          | 1,459          | 0,846          | 0,270          | 0,219          |



Şekil 3.13. Radyometrenin doğrusallık değerleri

Doğrusallık değerleri incelendiğinde 18 GHz frekansının üzerindeki frekanslarda -120 dBm için elde edilen değerler ve 24 GHz frekansının üzerindeki frekanslarda -110 dBm doğrusallık değerlerinin diğer değerlerden yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek olan bu değerler çıkarıldığında elde edilen diğer değerler Şekil 3.14'de verilmiştir.

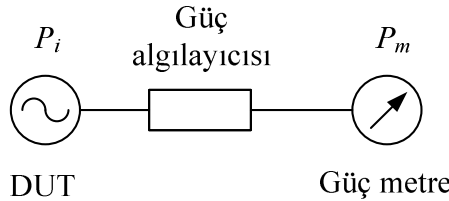


Şekil 3.14. Radyometrenin azaltılmış doğrusallık değerleri

### 3.6. Güç Ölçümleri

#### 3.6.1. Güç algılayıcısı ile güç ölçümleri

Ölçülmesi planlanan düşük seviyeli güç, diğer tüm güç seviyeleri gibi izlenebilirliğini 10 dBm güç'ten almaktadır. Bu izlenebilirliği oluşturmak ve çıkış gücü ölçülmesi planlanan işaret kaynağının (DUT) tüm güç seviyelerini görmek için, işaret kaynağının 0 dBm ile -70 dBm güç aralığı, bir güç algılayıcısı kullanılarak Şekil 3.15'de verilen düzenek kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 3.15. Güç algılayıcısı ile DUT gücü ölçme

DUT olarak kullanılan işaret kaynağı 250 kHz – 50 GHz frekans bandında, +20 dBm ile -140 dBm güç aralığında işaret üretebilen Agilent E8257D model, güç algılayıcısı ise 10 MHz – 26,5 GHz frekans aralığında +30 dBm ile -70 dBm aralığında güç

ölçme kabiliyetine sahip Agilent E4413A modeldir. Güç algılayıcı çıkışında ise Agilent E4417A model bir güç metre kullanılmıştır. Güç algılayıcısının kalibrasyon faktörü değeri, TÜBİTAK UME, RF ve Mikrodalga Laboratuvarı'nda ikincil seviye güç ölçme sistemi kullanılarak 0 dBm güç seviyesinde belirlenmiştir. Agilent E4413A model ve US38484022 seri numaralı bu güç algılayıcısına ait kalibrasyon faktörleri, kalibrasyon faktörü belirsizlikleri ve yansıma katsayıları Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Güç algılayıcısına ait parametreler

| Frekans (GHz) | Kalibrasyon faktörü, (KF) (%) | Belirsizlik (k=2) (%) | Yansıma katsayısı | Frekans (GHz) | Kalibrasyon faktörü, (KF) (%) | Belirsizlik (k=2) (%) | Yansıma katsayısı |
|---------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 0,05          | 100,58                        | 0,92                  | 0,0022            | 11            | 101,64                        | 1,07                  | 0,0474            |
| 0,1           | 101,61                        | 0,92                  | 0,0026            | 12            | 101,49                        | 1,10                  | 0,0502            |
| 0,2           | 101,71                        | 0,93                  | 0,0027            | 14            | 100,59                        | 1,44                  | 0,0517            |
| 0,3           | 101,79                        | 0,93                  | 0,0037            | 15            | 100,97                        | 1,35                  | 0,0541            |
| 0,4           | 102,07                        | 0,94                  | 0,0042            | 16            | 100,88                        | 1,28                  | 0,0433            |
| 0,5           | 102,16                        | 0,93                  | 0,0046            | 17            | 100,78                        | 1,31                  | 0,0238            |
| 1             | 102,78                        | 0,95                  | 0,0090            | 18            | 100,25                        | 1,31                  | 0,0254            |
| 2             | 102,62                        | 0,97                  | 0,0215            | 19            | 100,51                        | 1,91                  | 0,0363            |
| 3             | 102,57                        | 1,00                  | 0,0355            | 20            | 100,60                        | 2,00                  | 0,0351            |
| 4             | 101,98                        | 1,04                  | 0,0509            | 21            | 99,97                         | 1,76                  | 0,0108            |
| 5             | 102,05                        | 1,06                  | 0,0607            | 22            | 100,01                        | 1,76                  | 0,0295            |
| 6             | 102,14                        | 1,16                  | 0,0616            | 23            | 100,62                        | 2,01                  | 0,0540            |
| 7             | 101,92                        | 1,12                  | 0,0503            | 24            | 100,60                        | 2,08                  | 0,0574            |
| 8             | 101,86                        | 1,08                  | 0,0281            | 25            | 100,61                        | 1,89                  | 0,0329            |
| 9             | 101,94                        | 1,00                  | 0,0117            | 26            | 101,12                        | 1,79                  | 0,0157            |
| 10            | 101,87                        | 1,04                  | 0,0330            | 26,5          | 101,20                        | 1,82                  | 0,0252            |

DUT çıkışındaki gerçek güç Eşitlik (3.25) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_i = \frac{P_m}{KF} \quad (3.25)$$

Şekil 3.15 kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm sonucu, DUT'ye ait hesaplanan gerçek çıkış güç değerlerinin nominal değerden sapmaları (doğruluğu) Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. 0 dBm ile -70 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu

| Nominal güç (dBm) | 0,05GHz (dB) | 0,1GHz (dB) | 0,2GHz (dB) | 0,3GHz (dB) | 0,4GHz (dB) | 0,5GHz (dB) | 1GHz (dB) |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 0                 | 0,314        | 0,321       | 0,321       | 0,355       | 0,336       | 0,338       | 0,345     |
| -10               | 0,320        | 0,314       | 0,315       | 0,346       | 0,332       | 0,333       | 0,331     |
| -20               | 0,308        | 0,302       | 0,303       | 0,332       | 0,318       | 0,317       | 0,318     |
| -30               | 0,344        | 0,314       | 0,319       | 0,388       | 0,333       | 0,369       | 0,344     |
| -40               | 0,341        | 0,331       | 0,364       | 0,353       | 0,361       | 0,322       | 0,374     |
| -50               | 0,359        | 0,330       | 0,367       | 0,391       | 0,362       | 0,368       | 0,388     |
| -60               | 0,350        | 0,321       | 0,344       | 0,394       | 0,384       | 0,379       | 0,377     |
| -70               | -0,208       | -0,512      | -0,200      | 0,320       | 0,351       | 0,387       | 0,422     |

Tablo 3.6. 0 dBm ile -70 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 2GHz (dB) | 3GHz (dB) | 4GHz (dB) | 5GHz (dB) | 6GHz (dB) | 7GHz (dB) | 8GHz (dB) |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0                 | 0,386     | 0,012     | 0,023     | 0,014     | 0,025     | 0,009     | 0,015     |
| -10               | 0,375     | 0,003     | 0,001     | -0,007    | 0,004     | -0,008    | -0,001    |
| -20               | 0,358     | -0,010    | 0,087     | 0,066     | 0,074     | 0,063     | 0,078     |
| -30               | 0,436     | 0,055     | 0,120     | 0,070     | 0,115     | 0,067     | 0,153     |
| -40               | 0,378     | 0,033     | 0,074     | 0,006     | -0,017    | 0,030     | -0,085    |
| -50               | 0,433     | 0,094     | 0,097     | 0,015     | 0,026     | 0,043     | -0,003    |
| -60               | 0,414     | 0,060     | 0,207     | 0,207     | 0,150     | 0,205     | 0,035     |
| -70               | 1,428     | 0,842     | 0,715     | 0,924     | 0,974     | 1,218     | 1,243     |

Tablo 3.6. 0 dBm ile -70 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 9GHz (dB) | 10GHz (dB) | 11GHz (dB) | 12GHz (dB) | 13GHz (dB) | 14GHz (dB) | 15GHz (dB) |
|-------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0                 | 0,030     | 0,008      | 0,019      | 0,021      | 0,084      | 0,056      | 0,015      |
| -10               | 0,011     | -0,015     | 0,005      | 0,011      | 0,075      | 0,068      | 0,011      |
| -20               | 0,099     | 0,064      | 0,093      | 0,086      | 0,166      | 0,145      | 0,089      |
| -30               | 0,074     | 0,113      | 0,126      | 0,154      | 0,161      | 0,170      | 0,113      |
| -40               | 0,140     | -0,073     | 0,043      | 0,033      | 0,119      | 0,144      | 0,145      |
| -50               | 0,097     | -0,017     | 0,064      | 0,077      | 0,110      | 0,153      | 0,165      |
| -60               | 0,082     | 0,146      | 0,223      | 0,128      | 0,062      | 0,285      | 0,252      |
| -70               | 0,463     | 1,134      | 0,603      | 0,613      | -0,020     | 1,043      | 1,488      |

Tablo 3.6. 0 dBm ile -70 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 16GHz (dB) | 17GHz (dB) | 18GHz (dB) | 19GHz (dB) | 20GHz (dB) | 21GHz (dB) | 22GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0                 | 0,081      | 0,070      | 0,074      | 0,041      | 0,044      | 0,080      | 0,080      |
| -10               | 0,076      | 0,062      | 0,056      | 0,035      | 0,032      | 0,080      | 0,073      |
| -20               | 0,153      | 0,145      | 0,133      | 0,105      | 0,115      | 0,160      | 0,150      |
| -30               | 0,172      | 0,110      | 0,175      | 0,127      | 0,113      | 0,175      | 0,223      |
| -40               | 0,176      | 0,205      | 0,078      | 0,155      | 0,115      | 0,127      | 0,087      |
| -50               | 0,209      | 0,137      | 0,164      | 0,143      | 0,120      | 0,134      | 0,172      |
| -60               | 0,202      | 0,187      | 0,192      | 0,157      | 0,244      | 0,151      | 0,303      |
| -70               | 1,102      | 0,962      | 1,245      | 1,327      | 1,396      | 0,877      | 0,956      |

Tablo 3.6. 0 dBm ile -70 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 23GHz (dB) | 24GHz (dB) | 25GHz (dB) | 26GHz (dB) | 26,5GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 0                 | 0,102      | 0,082      | 0,084      | 0,061      | 0,002        |
| -10               | 0,096      | 0,071      | 0,050      | 0,037      | -0,045       |
| -20               | 0,177      | 0,146      | 0,111      | 0,111      | 0,026        |
| -30               | 0,210      | 0,173      | 0,154      | 0,201      | 0,040        |
| -40               | 0,114      | 0,131      | 0,121      | -0,024     | 0,068        |
| -50               | 0,146      | 0,137      | 0,159      | 0,091      | 0,034        |
| -60               | 0,186      | 0,319      | 0,200      | 0,170      | 0,084        |
| -70               | 1,056      | 0,608      | 0,483      | 0,495      | 0,441        |

DUT'ye ait gerçek güç değerleri için hesaplanan genişletilmiş belirsizlikler ise Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. 0 dBm ile -70 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2)

| Nominal güç (dBm) | 0,05GHz (dB) | 0,1GHz (dB) | 0,2GHz (dB) | 0,3GHz (dB) | 0,4GHz (dB) | 0,5GHz (dB) | 1GHz (dB) |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 0                 | 0,050        | 0,050       | 0,051       | 0,051       | 0,051       | 0,051       | 0,051     |
| -10               | 0,050        | 0,050       | 0,051       | 0,051       | 0,051       | 0,051       | 0,051     |
| -20               | 0,050        | 0,050       | 0,051       | 0,051       | 0,051       | 0,051       | 0,051     |
| -30               | 0,159        | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,159     |
| -40               | 0,159        | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,159     |
| -50               | 0,159        | 0,160       | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,159       | 0,160     |
| -60               | 0,214        | 0,255       | 0,190       | 0,181       | 0,184       | 0,191       | 0,185     |
| -70               | 1,044        | 2,624       | 1,121       | 0,694       | 0,588       | 1,321       | 1,108     |

Tablo 3.7. 0 dBm ile -70 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 2GHz (dB) | 3GHz (dB) | 4GHz (dB) | 5GHz (dB) | 6GHz (dB) | 7GHz (dB) | 8GHz (dB) |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0                 | 0,052     | 0,053     | 0,055     | 0,056     | 0,059     | 0,058     | 0,056     |
| -10               | 0,052     | 0,053     | 0,055     | 0,056     | 0,059     | 0,058     | 0,056     |
| -20               | 0,052     | 0,053     | 0,055     | 0,056     | 0,059     | 0,058     | 0,056     |
| -30               | 0,159     | 0,160     | 0,160     | 0,160     | 0,162     | 0,161     | 0,161     |
| -40               | 0,159     | 0,160     | 0,160     | 0,160     | 0,162     | 0,161     | 0,161     |
| -50               | 0,160     | 0,161     | 0,161     | 0,161     | 0,162     | 0,163     | 0,161     |
| -60               | 0,244     | 0,260     | 0,190     | 0,188     | 0,173     | 0,229     | 0,238     |
| -70               | 1,489     | 1,582     | 0,668     | 0,747     | 0,714     | 1,305     | 1,263     |

Tablo 3.7. 0 dBm ile -70 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 9GHz (dB) | 10GHz (dB) | 11GHz (dB) | 12GHz (dB) | 13GHz (dB) | 14GHz (dB) | 15GHz (dB) |
|-------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0                 | 0,053     | 0,055      | 0,056      | 0,057      | 0,065      | 0,072      | 0,070      |
| -10               | 0,053     | 0,055      | 0,056      | 0,057      | 0,065      | 0,072      | 0,070      |
| -20               | 0,053     | 0,055      | 0,056      | 0,057      | 0,065      | 0,072      | 0,070      |
| -30               | 0,160     | 0,160      | 0,160      | 0,161      | 0,164      | 0,167      | 0,166      |
| -40               | 0,160     | 0,160      | 0,160      | 0,161      | 0,164      | 0,167      | 0,166      |
| -50               | 0,162     | 0,162      | 0,161      | 0,162      | 0,165      | 0,167      | 0,166      |
| -60               | 0,222     | 0,248      | 0,199      | 0,192      | 0,251      | 0,206      | 0,208      |
| -70               | 1,683     | 1,541      | 1,240      | 0,981      | 2,030      | 0,843      | 0,973      |

Tablo 3.7. 0 dBm ile -70 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 16GHz (dB) | 17GHz (dB) | 18GHz (dB) | 19GHz (dB) | 20GHz (dB) | 21GHz (dB) | 22GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0                 | 0,066      | 0,066      | 0,066      | 0,091      | 0,094      | 0,083      | 0,084      |
| -10               | 0,066      | 0,066      | 0,066      | 0,091      | 0,094      | 0,083      | 0,084      |
| -20               | 0,066      | 0,066      | 0,066      | 0,091      | 0,094      | 0,083      | 0,084      |
| -30               | 0,164      | 0,164      | 0,164      | 0,176      | 0,177      | 0,172      | 0,172      |
| -40               | 0,164      | 0,164      | 0,164      | 0,176      | 0,178      | 0,172      | 0,172      |
| -50               | 0,166      | 0,166      | 0,166      | 0,178      | 0,179      | 0,173      | 0,173      |
| -60               | 0,211      | 0,263      | 0,292      | 0,318      | 0,284      | 0,256      | 0,221      |
| -70               | 0,908      | 1,545      | 1,618      | 2,227      | 1,604      | 1,620      | 1,159      |



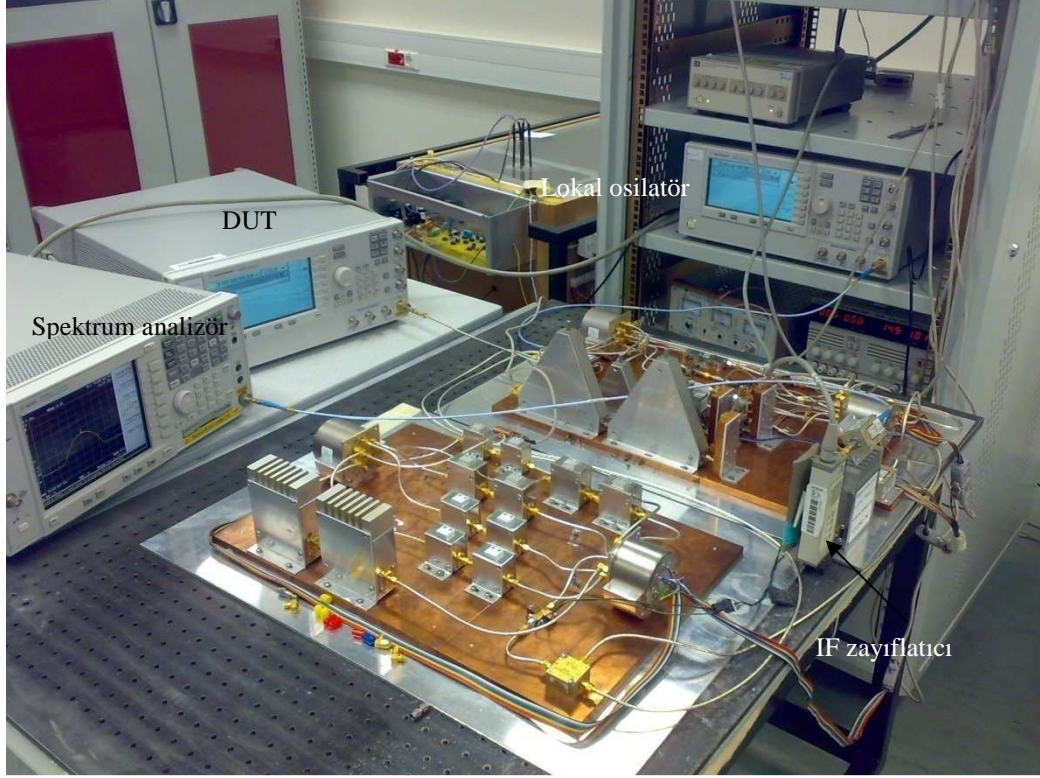
Tablo 3.7. 0 dBm ile -70 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 23GHz (dB) | 24GHz (dB) | 25GHz (dB) | 26GHz (dB) | 26,5GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 0                 | 0,098      | 0,102      | 0,090      | 0,084      | 0,086        |
| -10               | 0,098      | 0,102      | 0,090      | 0,084      | 0,086        |
| -20               | 0,098      | 0,102      | 0,090      | 0,084      | 0,086        |
| -30               | 0,180      | 0,182      | 0,175      | 0,172      | 0,173        |
| -40               | 0,180      | 0,182      | 0,175      | 0,172      | 0,173        |
| -50               | 0,180      | 0,183      | 0,178      | 0,173      | 0,174        |
| -60               | 0,230      | 0,209      | 0,202      | 0,208      | 0,190        |
| -70               | 1,715      | 0,672      | 1,206      | 0,945      | 0,716        |

Tablo 3.7’de verilen -70 dBm’de hesaplanan belirsizlikler diğer değerlere ait belirsizlikler ile kıyaslandığında yüksek olduğundan, güç algılayıcısı ile ölçülen ve burada kullanılan değerler -60 dBm’de bırakılmış ve izlenebilirlik bu değerden aktarılmasına karar verilmiştir.

### 3.6.2. Radyometre ile düşük güç ölçümleri

-60 dBm’den küçük güç ölçümleri için Şekil 3.9’da blok gösterimi verilmiş olan iyileştirilmiş sisteme, 50 MHz – 500 MHz frekans aralığındaki ölçme bölgesi girişinde bulunan anahtar girişine 6 dB’lik bir zayıflatıcının eklenmiş hali kullanılmıştır. Ölçme için kullanılan bu sisteme ait fotoğraf Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Düşük güç ölçme sistemi fotoğrafı

Yapılan ölçümlerden ve sistem parametrelerinden giriş gücü hesaplamak için temel yaklaşım Eşitlik (3.3)'de verildiği gibidir. Ancak, sistemdeki hatalar nedeni ile her bir güç değerinde kullanılacak hesaplama Eşitlik (3.23) ile verilmektedir. Eşitlik (3.23)'ü hesaplamalarda kullanmak için Eşitlik (3.2)'de verilen parametreler cinsinden yazmak gerekir. Bu nedenle, düşük güç ölçümünde referans kabul edilen güç değerinin hesaplanmasında kullanılacak eşitlik, Eşitlik (3.26)'daki gibi düzenlenebilir.

$$P_{ref} = \frac{1 + |\Gamma_g|^2 |R_i|^2}{|R_f|^2} |b_0|^2 \quad (3.26)$$

$$|b_0|^2 = \frac{1 + |\Gamma_1|^2 |A_{i0}|^2 + |\Gamma_s|^2 |A_{o0}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{f0}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{r0}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{i0}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{o0}|^2}{|A_{f0}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)} P_o$$

Benzer şekilde, referans güç değeri dışında ölçülen güç değeri için Eşitlik (3.23)'ü, Eşitlik (3.3)'de verilen parametreler cinsinden yazmak gerekir.

$$P_x = \frac{1 + |\Gamma_g|^2 |R_i|^2}{|R_f|^2} |b_x|^2 \quad (3.27)$$

$$|b_x|^2 = \frac{1 + |\Gamma_1|^2 |A_{ix}|^2 + |\Gamma_s|^2 |A_{ox}|^2 + |\Gamma_x|^2 |A_{fx}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{rx}|^2 + |\Gamma_x|^2 |A_{ix}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{ox}|^2}{|A_{fx}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)} P_1$$

Burada,  $x= 1, 2, \dots, 6$  olarak ölçülecek her bir güç seviyesine (-70, -80, -90, -100, -110 ve -120 dBm) karşı gelmektedir. Eşitlik (3.26) ve Eşitlik (3.27) kullanılarak Eşitlik (3.5)'e benzer olarak, ölçülen işaret kaynağının bilinmeyen güç değeri;

$$P_x = \frac{1 + |\Gamma_x|^2 |A_{ix}|^2 + |\Gamma_s|^2 |A_{ox}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{fx}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{rx}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{ix}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{ox}|^2}{1 + |\Gamma_1|^2 |A_{i0}|^2 + |\Gamma_s|^2 |A_{o0}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{f0}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{r0}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{i0}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{o0}|^2} \frac{|A_{f0}|^2}{|A_{fx}|^2} \frac{P_1}{P_o} P_{ref} \quad (3.28)$$

olarak elde edilir.

Çalışılan sayıların çok küçük olmaları nedeni ile, lineer olan Eşitlik (3.28) ile işlem yapmak yerine logaritmik düzlemde işlem yapmak daha kolaydır. Bu nedenle, Eşitlik (3.28) yeniden düzenlenirse;

$$P_x (dB) = 10 \log \left( \frac{1 + |\Gamma_x|^2 |A_{ix}|^2 + |\Gamma_s|^2 |A_{ox}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{fx}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{rx}|^2}{1 + |\Gamma_1|^2 |A_{i0}|^2 + |\Gamma_s|^2 |A_{o0}|^2 + |\Gamma_1|^2 |A_{f0}|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{r0}|^2} \right) + 10 \log \left( \frac{|A_{f0}|^2}{|A_{fx}|^2} \right) - 10 \log \left( |A_{o0}|^2 \right) + 10 \log(P_1) - 10 \log(P_o) + 10 \log(P_{ref}) \quad (3.29)$$

ifadesi elde edilir.

### 3.6.3. Ölçüm belirsizliği

Gerçekleştirilen ölçümlerin belirsizliklerini hesaplamak için Eşitlik (3.29)'dan yararlanılır. Bu eşitliğin ilk logaritmik terimi düzeltme katsayısı, ikinci ve üçüncü

logaritmik terimi IF adım zayıflatıcı parametreleri, dördüncü ve beşinci logaritmik terimleri dedektörden okunan güç ve altıncı logaritmik terimi ise referans gücün oluşmaktadır. Bu altı terimin belirsizliğe getirdiği katkılar aşağıda verilmiştir. Bunların dışında belirsizliğe katkı getiren iki belirsizlik bileşeni ise ölçme sisteminin doğrusallığı ve sistemin gürültü etkisidir.

### 3.6.3.1. Düzeltme katsayısı belirsizliği

Eşitlik (3.23) ile verilen düzeltme katsayısının değişim aralığı Eşitlik (3.24)'de verilmiştir. Sonuç olarak verilen gücün hesaplanmasında kullanılan Eşitlik (3.29)'dur. Eşitlik (3.24) ile verilen güç değişim aralığı kendi değerine bölünürse birim güç başına değişim bulunur. Böylece referans gücün ve ölçülen her bir gücün birim güç başına değişimi Eşitlik (3.30)'daki gibi olur.

$$u_{mP_0} = \frac{\Delta P_0}{P_0}, \quad u_{mP_x} = \frac{\Delta P_x}{P_x} \quad (3.30)$$

Bu iki ifade düzenlendiğinde,

$$u_{mP_0} = 2 \left( |\Gamma_1| |A_{i0}| + |\Gamma_s| |A_{o0}| + |\Gamma_1| |A_{f0}| |\Gamma_s| |A_{r0}| + 2 |\Gamma_1| |A_{i0}| |\Gamma_s| |A_{o0}| + |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s| |A_{i0}| |A_{f0}| |A_{r0}| \right) \\ + 2 \left( |\Gamma_1|^2 |A_{i0}|^2 |\Gamma_s| |A_{o0}| + |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_{o0}| |A_{f0}| |A_{r0}| + |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_{o0}|^2 |A_{i0}| + |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{f0}| |A_{r0}| |A_{i0}| |A_{o0}| \right) \quad (3.31)$$

ve benzer şekilde,

$$u_{mP_x} = \left( 2 \left( |\Gamma_1| |A_{ix}| + |\Gamma_s| |A_{ox}| + |\Gamma_1| |A_{fx}| |\Gamma_s| |A_{rx}| + 2 |\Gamma_1| |A_{ix}| |\Gamma_s| |A_{ox}| + |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s| |A_{ix}| |A_{fx}| |A_{rx}| \right) \right. \\ \left. + 2 \left( |\Gamma_1|^2 |A_{ix}|^2 |\Gamma_s| |A_{ox}| + |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_{ox}| |A_{fx}| |A_{rx}| + |\Gamma_s|^2 |\Gamma_1| |A_{ox}|^2 |A_{ix}| + |\Gamma_1|^2 |\Gamma_s|^2 |A_{fx}| |A_{rx}| |A_{ix}| |A_{ox}| \right) \right) \quad (3.32)$$

elde edilir. Elde edilen bu değerler U-tipi dağılıma sahip olup, standart belirsizliği bulabilmek için Ek A'da verildiği gibi  $\sqrt{2}$ 'ye bölmek gerekmektedir. Böylece düzeltme katsayısından kaynaklanan belirsizlik değeri ( $u_m$ ) Eşitlik (3.33)'deki gibi hesaplanır.

$$u_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{u_{mP_0}^2 + u_{mP_x}^2} \quad (3.33)$$

Lineer olan bu değeri logaritmik olarak kullanabilmek için,

$$u_m(dB) = 10 \log(1 + u_m) \quad (3.34)$$

dönüşümü gerekmektedir.

### 3.6.3.2. IF adım zayıflatıcı belirsizliği

Standart olarak kullanılan IF adım zayıflatıcı nedeni ile iki belirsizlik bileşeni gelmektedir. Bunlardan bir tanesi referans noktanın ölçüm belirsizliği ( $u_{A0}$ ) diğeri ise ölçülen güç değeri için ölçüm belirsizliği ( $u_{Ax}$ )'dir. IF adım zayıflatıcının kullanıldığı frekans sadece IF frekansı olan 50 MHz'dir. Bu frekansa karşılık gelen her bir zayıflatma değeri için belirsizlik, zayıflatıcı sertifikasından alınır. Sertifikadan alınan belirsizlik  $k=2$  olup normal dağılıma sahiptir.

### 3.6.3.3. Dedektör belirsizliği

Sistemde dedektör olarak 10 dB zayıflatıcı, yükselteç ve spektrum analizör kullanılmaktadır. Dedektörden A tipi ve B tipi belirsizlik oluşmaktadır. A tipi belirsizlik, her bir ölçüm noktasında tekrarlı ölçümlerden kaynaklanan standart sapma belirsizliğidir. Referans güç noktası belirsizliği  $u_{P0}$ , diğer noktaların standart sapma belirsizliği  $u_{P1}$ 'dir. Diğer bir A tipi belirsizlik ise dedektör gürültüsüdür. Gürültü, ölçüm yapılan güç değeri ile dedektörün gürültü seviyesi arasındaki farktan yararlanılarak hesaplanır. Örneğin, dedektörden ölçülen güç -60 dBm ve gürültü seviyesi -85 dBm ise gürültünün belirsizliğe katkısı Eşitlik (3.35) kullanılarak 0,0137 dB olarak hesaplanır.

$$u_n(dB) = 10 \log(1 + 10^{(-85 - (-60))/10}) \quad (3.35)$$

Bu belirsizlik normal dağılıma sahiptir. Referans güç noktasının gürültü belirsizliği çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir.

### 3.6.3.4. Doğrusallık belirsizliği

Radyometrenin doğrusallık ölçümleri sonucunda elde edilen değerlerden yararlanılarak doğrusallık belirsizliği ( $u_{lin}$ ) hesaplanır. Bu değer dikdörtgen dağılıma sahip olup standart belirsizliği bulabilmek için  $\sqrt{3}$ 'e bölmek gerekmektedir.

### 3.6.3.5. Referans güç belirsizliği

Güç algılayıcısı ile gerçekleştirilen ölçümlerden referans olarak kullanılan güç değerine ait belirsizlik değeridir ( $u_{ref}$ ). Normal dağılıma sahiptir.

### 3.6.3.6. Bileşik belirsizlik

Her bir belirsizlik hesaplandıktan sonra toplam belirsizlik, belirsizlik bileşenlerinin karelerinin toplamının kökü alınarak Eşitlik (3.36) ile hesaplanmıştır.

$$u_b (dB) = \sqrt{u_m^2 + u_{A0}^2 + u_{Ax}^2 + u_n^2 + u_{P0}^2 + u_{Px}^2 + u_{lin}^2 + u_{ref}^2} \quad (3.36)$$

Genişletilmiş bileşik belirsizlik ise ( $k=2$ ),

$$U (dB) = 2u_b \quad (3.37)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

## 3.7. Düşük Güç Ölçüm Sonuçları

Değiştirilmiş radyometre kullanılarak oluşturulmuş sistem ile gerçekleştirilen ölçümler sonucu elde edilen verilerden hesaplanan düşük güç ölçümlerinin nominal değerden sapmaları Tablo 3.8’de ve bu ölçümlere ait hesaplanan genişletilmiş belirsizlikler ise Tablo 3.9’da verilmiştir. Tasarlanan sistem ile gerçekleştirilen düşük güç ölçümleri otomatik olarak gerçekleştirilmiş olup, bunun için bir yazılım geliştirilmiştir. Ayrıca, bu ölçümlerin grafik olarak gösterimi de Ek B’de verilmiştir.

Tablo 3.8. -60 dBm ile -120 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu

| Nominal güç (dBm) | 0,05GHz (dB) | 0,1GHz (dB) | 0,2GHz (dB) | 0,3GHz (dB) | 0,4GHz (dB) | 0,5GHz (dB) | 1GHz (dB) |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| -60               | 0,350        | 0,321       | 0,344       | 0,394       | 0,384       | 0,379       | 0,377     |
| -70               | 0,460        | 0,426       | 0,565       | 0,634       | 0,459       | 0,466       | 0,445     |
| -80               | 0,458        | 0,400       | 0,586       | 0,582       | 0,459       | 0,382       | 0,457     |
| -90               | 0,603        | 0,414       | 0,608       | 0,645       | 0,483       | 0,436       | 0,489     |
| -100              | 0,592        | 0,380       | 0,589       | 0,619       | 0,460       | 0,404       | 0,512     |
| -110              | -10,057      | 0,322       | 0,586       | 0,662       | 0,465       | 0,414       | 0,627     |
| -120              | -16,252      | -0,402      | 0,440       | 0,551       | 0,378       | 0,284       | 1,065     |

Tablo 3.8. -60 dBm ile -120 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 2GHz (dB) | 3GHz (dB) | 4GHz (dB) | 5GHz (dB) | 6GHz (dB) | 7GHz (dB) | 8GHz (dB) |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| -60               | 0,414     | 0,060     | 0,207     | 0,207     | 0,150     | 0,205     | 0,035     |
| -70               | 0,610     | 0,258     | 0,350     | 0,522     | 0,356     | 0,391     | 0,297     |
| -80               | 0,501     | 0,196     | 0,226     | 0,448     | 0,196     | 0,297     | 0,031     |
| -90               | 0,590     | 0,285     | 0,248     | 0,468     | 0,247     | 0,309     | 0,110     |
| -100              | 0,543     | 0,266     | 0,325     | 0,526     | 0,311     | 0,360     | 0,218     |
| -110              | 0,560     | 0,331     | 0,299     | 0,488     | 0,326     | 0,275     | 0,258     |
| -120              | 0,083     | 0,261     | 0,098     | 0,014     | -0,004    | -0,270    | -0,138    |

Tablo 3.8. -60 dBm ile -120 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 9GHz (dB) | 10GHz (dB) | 11GHz (dB) | 12GHz (dB) | 13GHz (dB) | 14GHz (dB) | 15GHz (dB) |
|-------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -60               | 0,082     | 0,146      | 0,223      | 0,128      | 0,062      | 0,285      | 0,252      |
| -70               | 0,215     | 0,275      | 0,313      | 0,280      | 0,125      | 0,388      | 0,349      |
| -80               | 0,248     | -0,005     | 0,193      | 0,163      | 0,032      | 0,331      | 0,323      |
| -90               | 0,224     | 0,085      | 0,234      | 0,214      | 0,065      | 0,350      | 0,366      |
| -100              | 0,313     | 0,105      | 0,333      | 0,305      | 0,101      | 0,382      | 0,397      |
| -110              | 0,238     | 0,151      | 0,363      | 0,348      | 0,052      | 0,294      | 0,395      |
| -120              | 0,010     | 0,081      | 0,333      | 0,231      | -0,158     | 0,128      | 0,288      |

Tablo 3.8. -60 dBm ile -120 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 16GHz (dB) | 17GHz (dB) | 18GHz (dB) | 19GHz (dB) | 20GHz (dB) | 21GHz (dB) | 22GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -60               | 0,202      | 0,187      | 0,192      | 0,157      | 0,244      | 0,151      | 0,303      |
| -70               | 0,288      | 0,233      | 0,279      | 0,398      | 0,538      | 0,332      | 0,511      |
| -80               | 0,307      | 0,211      | 0,145      | 0,397      | 0,555      | 0,211      | 0,301      |
| -90               | 0,324      | 0,189      | 0,254      | 0,412      | 0,511      | 0,238      | 0,393      |
| -100              | 0,391      | 0,288      | 0,297      | 0,584      | 0,554      | 0,217      | 0,492      |
| -110              | 0,386      | 0,246      | 0,424      | 0,681      | 0,139      | -0,036     | 0,498      |
| -120              | 0,288      | 0,164      | 0,362      | -0,787     | -1,596     | -0,981     | -0,098     |

Tablo 3.8. -60 dBm ile -120 dBm DUT güç çıkışı doğruluğu (devam)

| Nominal güç (dBm) | 23GHz (dB) | 24GHz (dB) | 25GHz (dB) | 26GHz (dB) | 26,5GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| -60               | 0,186      | 0,319      | 0,200      | 0,170      | 0,084        |
| -70               | 0,434      | 0,436      | 0,275      | 0,299      | 0,144        |
| -80               | 0,293      | 0,354      | 0,150      | 0,037      | 0,159        |
| -90               | 0,332      | 0,355      | 0,298      | 0,124      | 0,193        |
| -100              | 0,513      | 0,473      | 0,338      | 0,039      | 0,482        |
| -110              | 0,402      | 0,324      | 0,699      | -0,084     | 0,717        |
| -120              | -0,521     | -0,357     | 0,434      | -0,321     | 0,676        |

Tablo 3.9. -60 dBm ile -120 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2)

| Nominal güç (dBm) | 0,05GHz (dB) | 0,1GHz (dB) | 0,2GHz (dB) | 0,3GHz (dB) | 0,4GHz (dB) | 0,5GHz (dB) | 1GHz (dB) |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| -60               | Ref          | Ref         | Ref         | Ref         | Ref         | Ref         | Ref       |
| -70               | 0,297        | 0,324       | 0,335       | 0,282       | 0,207       | 0,207       | 0,208     |
| -80               | 0,317        | 0,345       | 0,352       | 0,304       | 0,221       | 0,210       | 0,216     |
| -90               | 0,318        | 0,353       | 0,372       | 0,324       | 0,226       | 0,213       | 0,214     |
| -100              | 0,305        | 0,334       | 0,361       | 0,330       | 0,212       | 0,205       | 0,194     |
| -110              | -            | 0,317       | 0,388       | 0,362       | 0,206       | 0,204       | 0,254     |
| -120              | -            | 0,272       | 0,343       | 0,373       | 0,212       | 0,406       | 0,906     |

Tablo 3.9. -60 dBm ile -120 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 2GHz (dB) | 3GHz (dB) | 4GHz (dB) | 5GHz (dB) | 6GHz (dB) | 7GHz (dB) | 8GHz (dB) |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| -60               | Ref       | Ref       | Ref       | Ref       | Ref       | Ref       | Ref       |
| -70               | 0,254     | 0,322     | 0,271     | 0,200     | 0,243     | 0,339     | 0,309     |
| -80               | 0,259     | 0,341     | 0,273     | 0,197     | 0,284     | 0,367     | 0,319     |
| -90               | 0,258     | 0,347     | 0,282     | 0,198     | 0,290     | 0,396     | 0,336     |
| -100              | 0,259     | 0,334     | 0,271     | 0,194     | 0,274     | 0,387     | 0,340     |
| -110              | 0,266     | 0,346     | 0,235     | 0,195     | 0,305     | 0,397     | 0,341     |
| -120              | 0,311     | 0,324     | 0,231     | 0,233     | 0,487     | 0,388     | 0,333     |

Tablo 3.9. -60 dBm ile -120 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 9GHz (dB) | 10GHz (dB) | 11GHz (dB) | 12GHz (dB) | 13GHz (dB) | 14GHz (dB) | 15GHz (dB) |
|-------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -60               | Ref       | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        |
| -70               | 0,289     | 0,255      | 0,231      | 0,285      | 0,257      | 0,227      | 0,223      |
| -80               | 0,342     | 0,261      | 0,236      | 0,283      | 0,275      | 0,238      | 0,221      |
| -90               | 0,321     | 0,254      | 0,247      | 0,283      | 0,265      | 0,247      | 0,216      |
| -100              | 0,312     | 0,256      | 0,243      | 0,308      | 0,258      | 0,229      | 0,218      |
| -110              | 0,321     | 0,256      | 0,229      | 0,297      | 0,269      | 0,253      | 0,215      |
| -120              | 0,317     | 0,274      | 0,221      | 0,267      | 0,267      | 0,306      | 0,268      |

Tablo 3.9. -60 dBm ile -120 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 16GHz (dB) | 17GHz (dB) | 18GHz (dB) | 19GHz (dB) | 20GHz (dB) | 21GHz (dB) | 22GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -60               | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        |
| -70               | 0,225      | 0,277      | 0,300      | 0,384      | 0,361      | 0,295      | 0,247      |
| -80               | 0,223      | 0,287      | 0,298      | 0,420      | 0,371      | 0,274      | 0,267      |
| -90               | 0,219      | 0,273      | 0,302      | 0,404      | 0,384      | 0,312      | 0,302      |
| -100              | 0,220      | 0,279      | 0,301      | 0,407      | 0,357      | 0,306      | 0,243      |
| -110              | 0,216      | 0,285      | 0,298      | 0,481      | 0,365      | 0,281      | 0,288      |
| -120              | 0,271      | 0,280      | 0,313      | 0,742      | 0,426      | 0,868      | 0,671      |



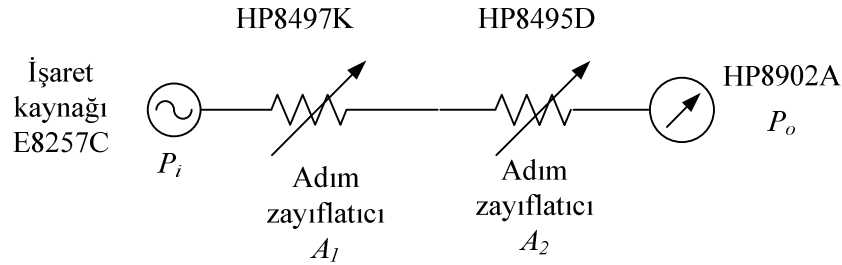
Tablo 3.9. -60 dBm ile -120 dBm DUT gerçek güç belirsizlikleri (k=2) (devam)

| Nominal güç (dBm) | 23GHz (dB) | 24GHz (dB) | 25GHz (dB) | 26GHz (dB) | 26,5GHz (dB) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| -60               | Ref        | Ref        | Ref        | Ref        | Ref          |
| -70               | 0,366      | 0,236      | 0,266      | 0,222      | 0,203        |
| -80               | 0,433      | 0,256      | 0,234      | 0,251      | 0,197        |
| -90               | 0,362      | 0,240      | 0,265      | 0,252      | 0,300        |
| -100              | 0,369      | 0,326      | 0,444      | 0,257      | 0,229        |
| -110              | 0,267      | 0,256      | 0,913      | 0,259      | 0,830        |
| -120              | 0,726      | 0,598      | 2,150      | 0,360      | 3,037        |

50 MHz frekans değerinde -110 ve -120 dBm değerinde ölçülen güç değerleri nominalde uzak elde edildiğinden, söz konusu değerler için belirsizlik hesaplanmamıştır.

### 3.8. Yapılan Ölçümlerin Ölçüm Alıcısı Sonuçları ile Karşılaştırılması

Önerilen sistem kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçlarını başka bir ölçme sistemi ile karşılaştırmak için, iki adet zayıflatıcı ve bir adet ölçüm alıcısı (HP8902A) kullanılarak Şekil 3.17'deki düzenek kurulmuştur.

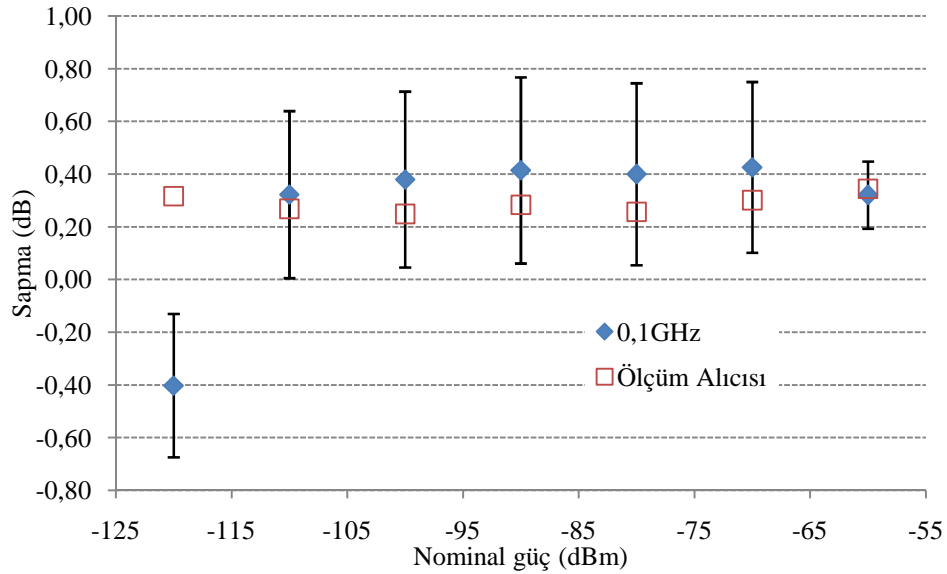


Şekil 3.17. Düşük güç ölçme sistemi doğrulama düzeneği

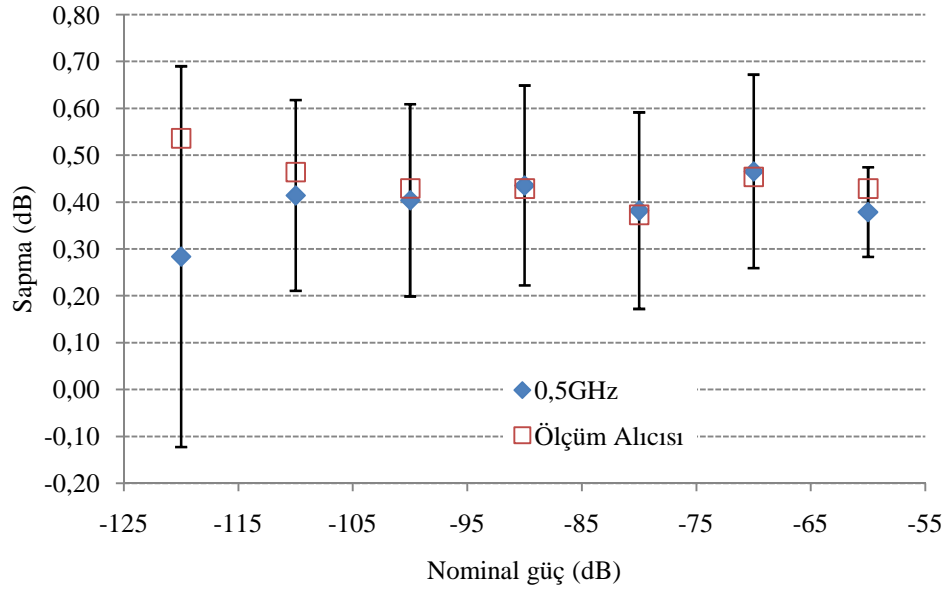
Bu düzenek ile ölçüm, yukarıda önerilen ölçüm düzeneğe benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Çünkü HP8902A ölçüm alıcısı ile doğrudan ölçüm alınmak istendiğinde bu cihazın doğrusallık ve dedektör bölge geçişleri nedeni ile hem ölçüm alınması zorlaşmakta, hem de belirsizlik değeri büyük elde edilmektedir.

Burada kullanılan ölçüm yöntemi yukarıda anlatılan ile benzer olduğundan referans bir ölçüm noktasına ihtiyaç vardır. Referans ölçüm noktası olarak -10 dBm güç değeri seçilmiştir. -10 dBm'de işaret kaynağı çıkış gücü, standart bir güç algılayıcısı ile ölçülmüştür. Aynı güç değeri daha sonra ölçüm düzeneği ile ölçülerek iki güç

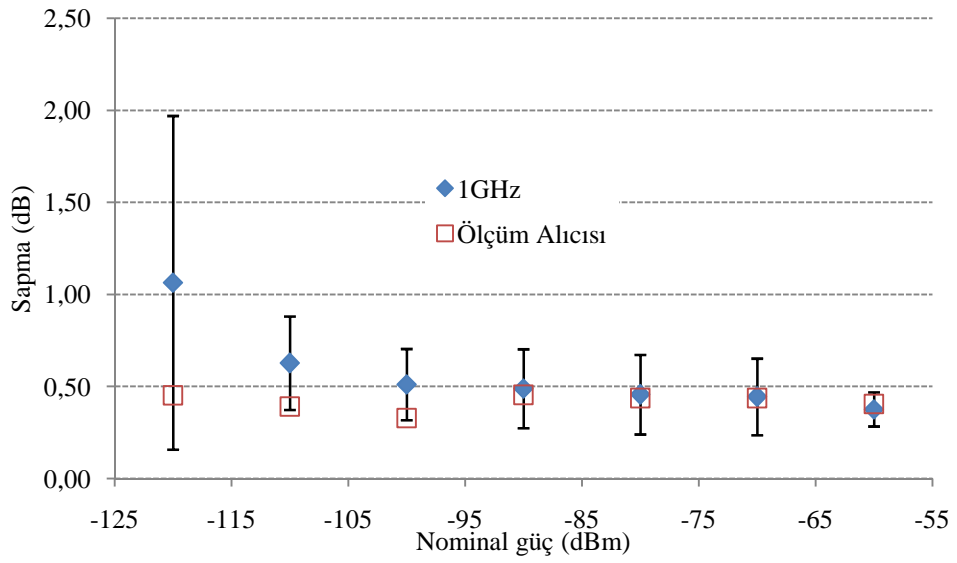
arasındaki fark ölçüm düzeneği için düzeltme değeri olarak kullanılmıştır. Ölçüm alıcısı girişine okuma yapabilen en düşük güç seviyesi uygulanacak şekilde adım zayıflatıcılar ayarlanmıştır. İşaret kaynağı çıkış gücü azaltılarak buna karşılık adım zayıflatıcı değerleri artırılmış ve her adımda ölçüm alıcısında aynı güç seviyesinin ölçülmesi sağlanmıştır. Böylece ölçüm alıcısından kaynaklanabilecek hatalar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Ancak ölçüm alıcısının ölçüm siresinin fazla olması ve düşük güçleri yakalamadaki zorluğu nedeni ile ölçümler oldukça uzun zaman almış ve zahmetli olmuştur. Bu nedenle, ölçüm alıcısı düzeneği ile tüm frekanslarda ölçüm gerçekleştirmek yerine 0,1 GHz, 0,5 GHz, 1 GHz, 4 GHz, 8 GHz, 12 GHz, 15 GHz, 18 GHz, 22 GHz ve 26,5 GHz frekans noktaları seçilmiş ve bu noktalarda ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçüm verilerinden zayıflatıcı etkisi çıkartılmıştır. Önerilen ölçme düzeneği ve ölçüm alıcısı ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Şekil 3.18 - Şekil 3.27’de verilmiştir.



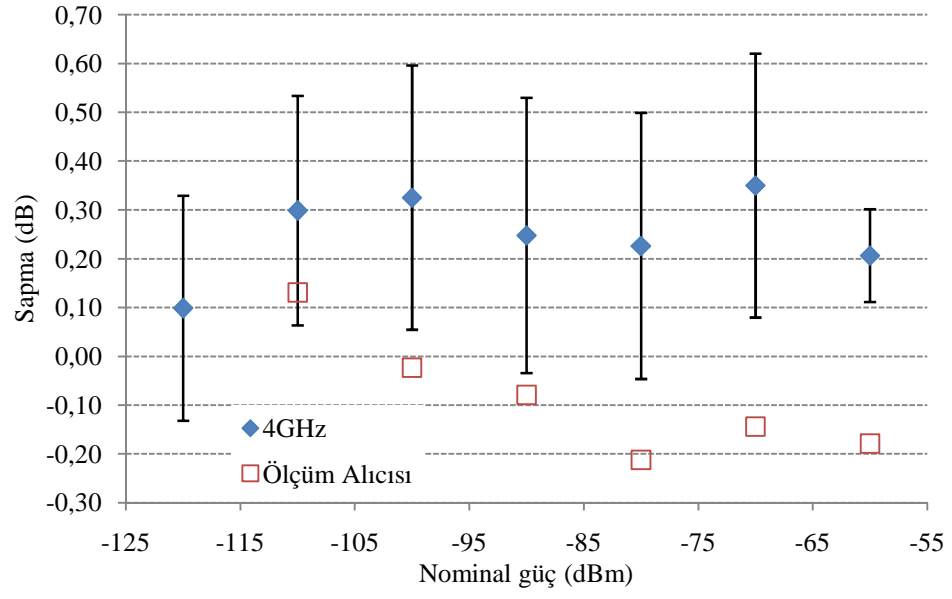
Şekil 3.18. 0,1 GHz güç değerleri



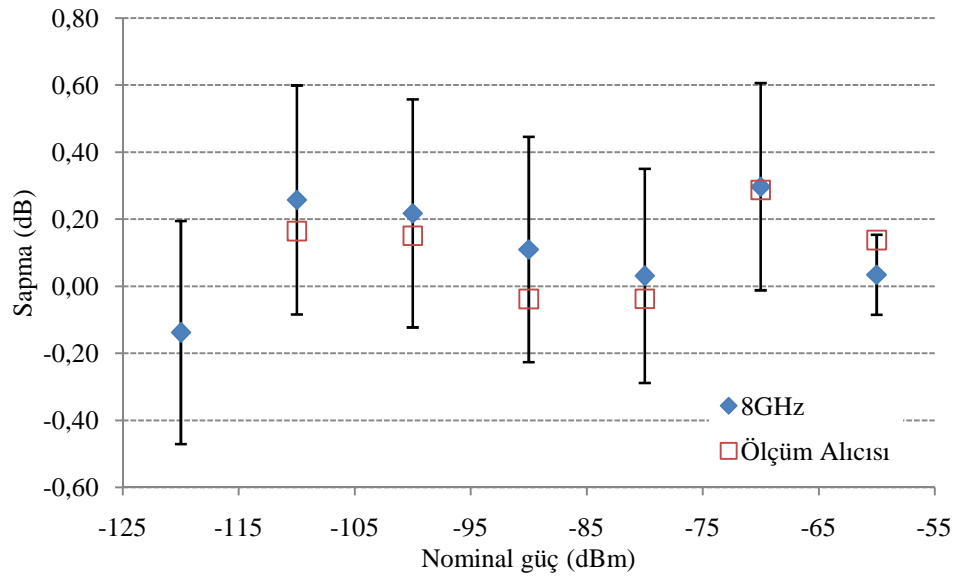
Şekil 3.19. 0,5 GHz güç değerleri



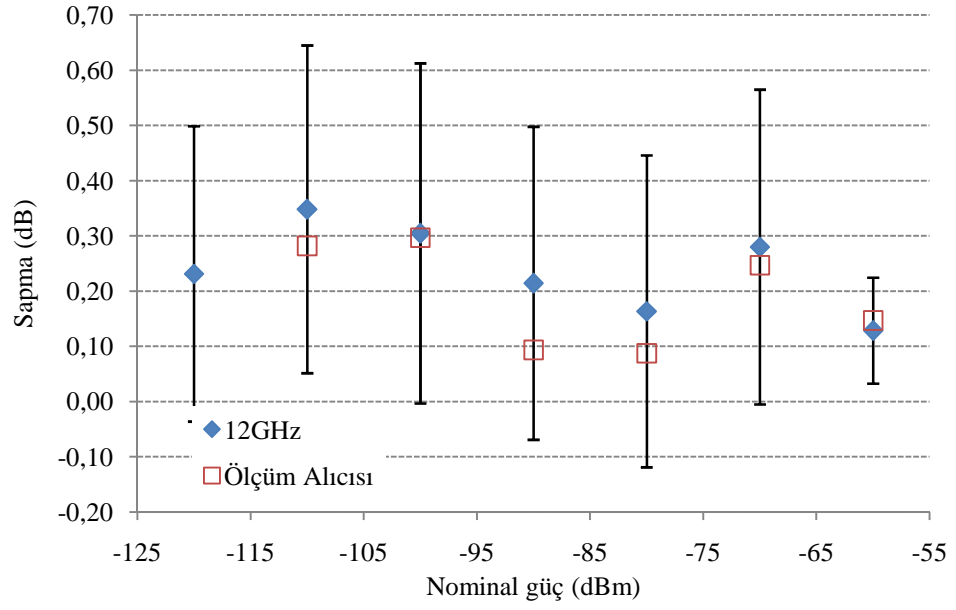
Şekil 3.20. 1 GHz güç değerleri



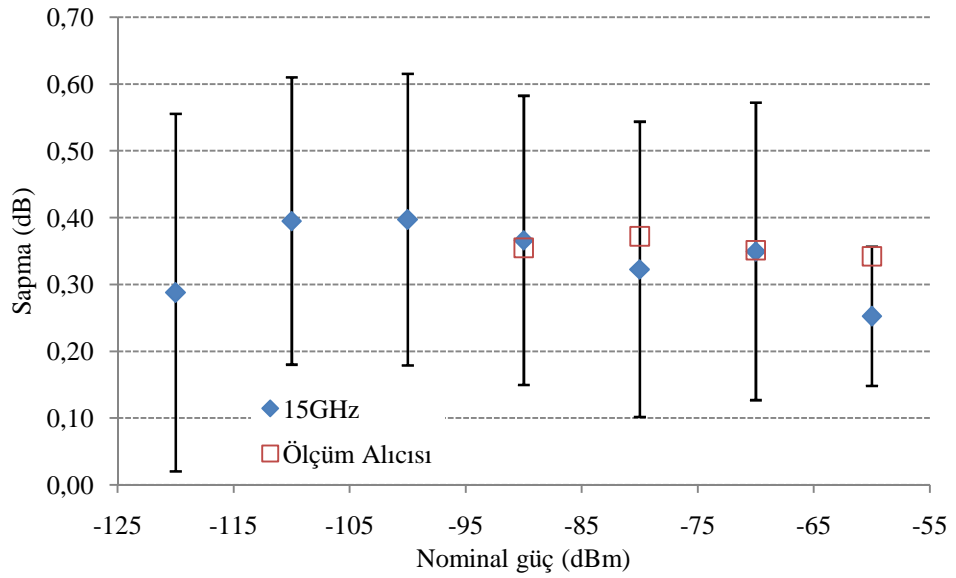
Şekil 3.21. 4 GHz güç değerleri



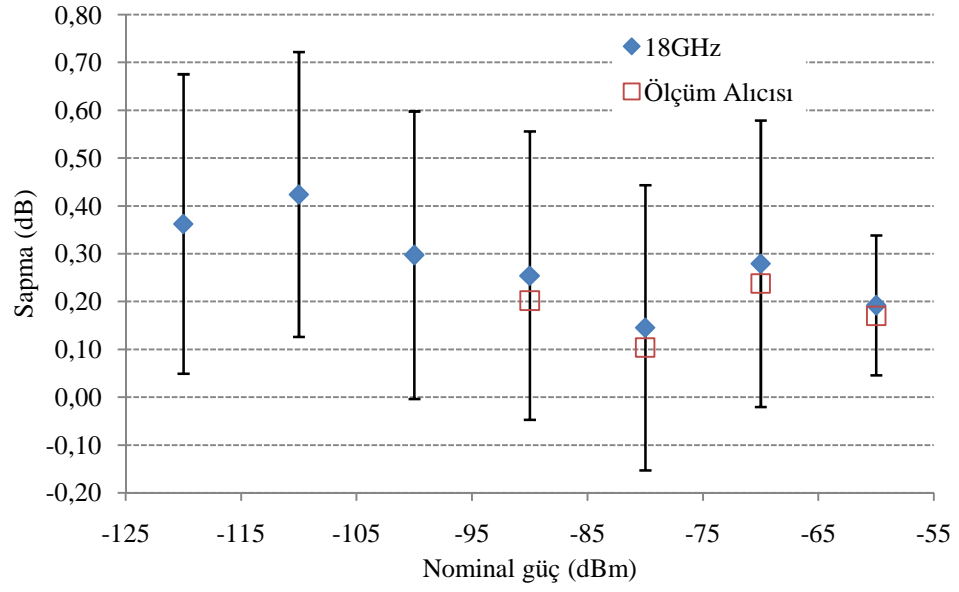
Şekil 3.22. 8 GHz güç değerleri



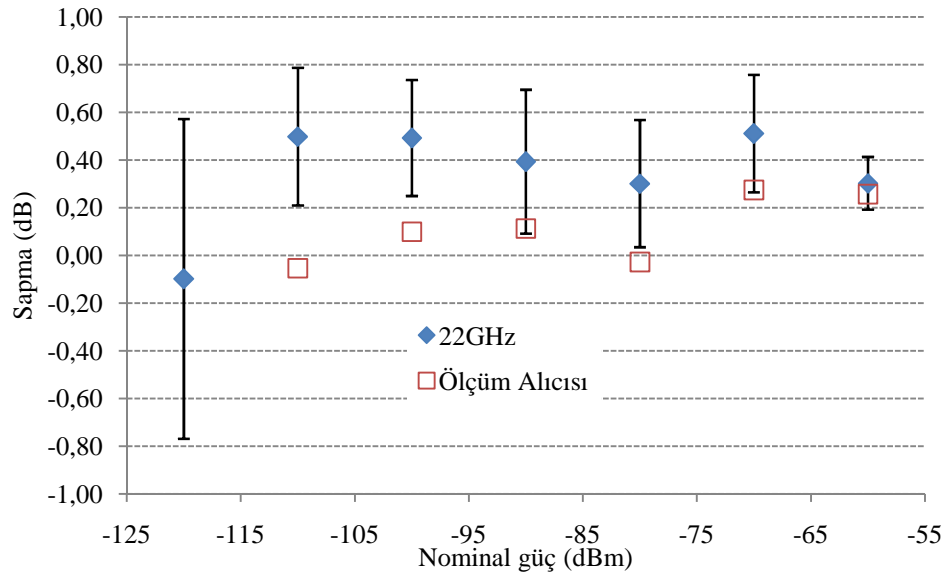
Şekil 3.23. 12 GHz güç değerleri



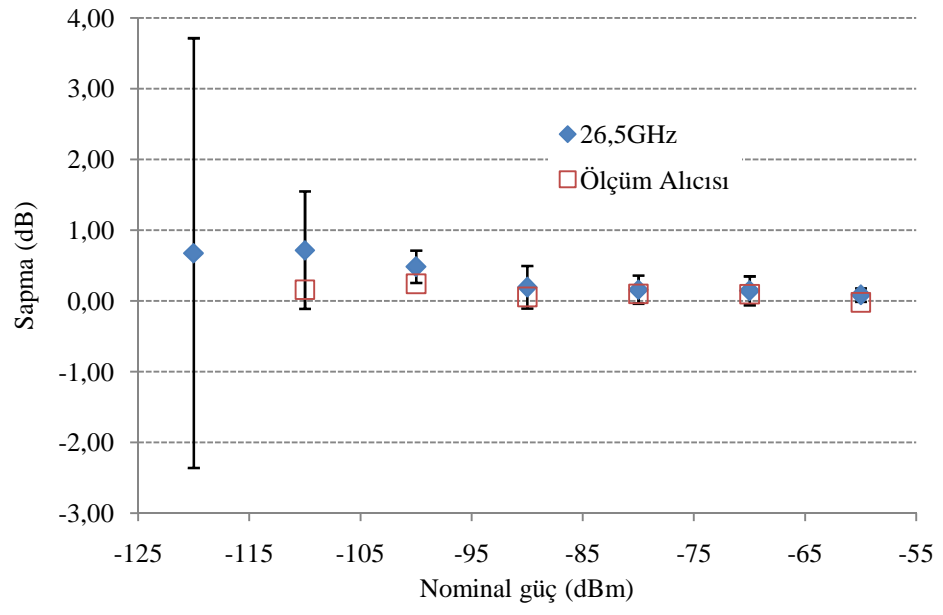
Şekil 3.24. 15 GHz güç değerleri



Şekil 3.25. 18 GHz güç değerleri



Şekil 3.26. 22 GHz güç değerleri



Şekil 3.27. 26,5 GHz güç değerleri

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mikrodalga gürültü ölçümlerini, yarı iletken bir gürültü kaynağının sahip olduğu geniş bantta, hiç tak-çıkart yapmadan tek seferde yapma imkanı tanıyan bir gürültü ölçme sistemi geliştirilmiştir. Aynı zamanda, gürültü ölçme sisteminin yeniden düzenlenmesi ile çok düşük seviyelere sahip CW işaretin uluslararası sisteme izlenebilir şekilde ölçülmesi sağlanmıştır.

Gürültü ölçümlerini gerçekleştirmek için ilk olarak, toplam güç radyometrenin sıcaklık bağımlılığı incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, eğer radyometre yeterince büyük bir ısı kütle üzerine kurulacak şekilde tasarlanırsa aktif olarak sıcaklık bağımlılığının ölçüm sonucuna etkisinin çok sınırlı olacağı ve ihmal edilebileceği ortaya konmuştur. Böylece, bir gürültü ölçme sistemi için oldukça geniş bir bölge olarak kabul edilen 50 MHz – 26,5 GHz frekans aralığında çalışacak bir toplam güç radyometre tasarımı aktif sıcaklık kontrolü olmadan gerçekleştirilebilmiştir.

Geniş bantta radyometreyi kullanabilmek için dar bantlı cihazların bir arada kullanımını gerektiğinden bu sorunu aşmak için, mikrodalga anahtar kullanımı önerilmiştir. Ancak kullanılan anahtarın, toplam güç radyometrenin kazanca olan bağımlılığına etkisini ihmal edilebilir seviyelere çekmek için testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda klasik bir anahtarın kazanca olan etkisinin çok büyük olduğu teorik olarak gösterilmiştir. Teorik sonucu desteklemek için çıkış empedansı değişken bir LNA'nın kazancı incelenmiş ve LNA kaynak empedansı karakteristik empedansa yakın ve değişmezken, yük yansıma katsayısı 0 ile 0,8 arasında değiştirilmiş ve bu durumda kazanç değişiminin 12 dB'ye kadar çıktığı gösterilmiştir. Kazanç değişiminin önüne geçmek için tasarlanan sistemde klasik mikrodalga anahtar yerine sistemde kullanılmayan kanalın sürekli olarak uyumlu yük ile yüklendiği bir anahtar kullanılmıştır.

Toplam güç radyometre kullanılarak nominal 10000 K gürültü sıcaklığına sahip yarı iletken bir gürültü kaynağının gürültü sıcaklığı ölçülmüş ve bu cihazın İngiltere'nin NPL Laboratuvarı tarafından verilen değerleri (gerçek değer) ile kıyaslanmıştır. Bu



ölçümlerden gürültü sıcaklığı genişletilmiş belirsizliği ( $k=2$ ), 50 MHz – 26,5 GHz frekans bölgesi için 234 K – 713 K aralığında hesaplanmıştır. NPL tarafından verilen belirsizlikler ise ( $k=2$ ) 120 K – 500 K aralığındadır. Aynı zamanda ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki farklar -543 K – +816 K aralığında olup ölçülen değere atfedilen belirsizlik, gerçek değer belirsizlik sınırları içerisinde kalmaktadır. Yapılan testler sonucunda, tasarımı yapılarak kurulumu gerçekleştirilen toplam güç radyometre kullanılarak, BIPM veritabanında yer alan başka bir ülkenin metroloji enstitüsü ile ikili bir karşılaştırma (dünyada kabul gören kalite sistemi ISO 17025, gereği) yapılması sonrasında BIPM veritabanında yer alan “Calibration and Measurement Capability” (CMC, kalibrasyon ve ölçme yeteneği) için başvurulabileceği ve endüstriyel hizmet verilebileceği anlaşılmaktadır.

İkinci aşamada, toplam güç radyometre düşük güç ölçümleri yapabilecek şekilde değiştirilmiştir. Yeni ölçme sisteminin matematiksel modeli oluşturularak hata analizi yapılmıştır. Kurulan sisteme ait hesaplanan denklem kullanılarak sistemin belirsizlik model fonksiyonu oluşturulmuştur. Elde edilen denklemler kullanılarak ölçümler yapılmış ve sistemin performans test analizi yapılmıştır. Elde edilen ilk değerler tatmin edici sonuçlar vermeyince sistem üzerinde revizyona gidilerek, sistem parametreleri iyileştirilmiştir. Böylece empedans uyumsuzluğu, dedektör, doğrusallık, referans güç değeri ve standart adım zayıflatıcının belirsizlik etkileri incelenmiş ve düşük güç ölçme sistemine ait bileşik belirsizlik oluşturulmuştur. Geliştirilen sistem kullanılarak, bir işaret kaynağının -70 dBm ile -120 dBm aralığındaki çıkış güçleri 26,5 GHz frekansına kadar ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, bu sistemin -70 dBm ile -120 dBm güç aralığını 100 MHz – 18 GHz frekans aralığında, -70 dBm ile -110 dBm güç aralığını 50 MHz – 24 GHz frekans aralığında ve -70 dBm ile -100 dBm güç aralığını 50 MHz – 26,5 GHz frekans aralığında oldukça verimli bir şekilde ölçeceği göstermektedir. Söz konusu bu güç ve frekans bölgesinde ölçme sisteminden kaynaklı hesaplanan genişletilmiş bileşik belirsizlik 0,05 dB ile 0,89 dB arasında ve ölçülen güce ait genişletilmiş bileşik belirsizlik ( $k=2$ ) ise 0,19 dB ile 0,91 dB aralığında değişmektedir ki bu değerler, söz konusu güç değerleri için düşük olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, sistemin 50 MHz – 26,5 GHz frekans aralığı ve -70 dBm – -120 dBm aralığındaki ölçümleri için elde edilen genişletilmiş bileşik belirsizliği ( $k=2$ ) ise 0,19 dB – 3,04 dB

aralığındadır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, bu sistem kullanılarak yüksek frekanslarda düşük güç ölçümlerinin uluslararası sisteme izlenebilir bir şekilde gerçekleştirilmesi mümkün olabilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Einstein A., Investigations on the theory of the Brownian movement I (On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular-kinetic theory of heat), *Ann.d.Phys.*, 1905, **17**, 549-560. (Edited by R. Fürth, Newyork, Dower Publications Inc. 1956).
- [2] Johnson J. B., Thermal agitation of electricity in conductors, *Physical Review*, 1928, **32**, 97-109.
- [3] Nyquist H., Thermal agitation of electric charge in conductors, *Physical Review*, 1928, **32**, 110-113.
- [4] Dicke R. H., The measurement of thermal radiation at microwave frequencies, *Rev. Sci. Instrum.*, 1946, **17**, 268-275.
- [5] Garrison J. B., Lawson A. W., An absolute noise thermometer for high temperatures and high pressures, *Review of Scientific Instruments*, 1949, **20**, 11, 785 – 794.
- [6] Skou N., *Microwave radiometer systems: Design and analysis*, Artech House, 8-11, 1989.
- [7] Gilreath L., Jain V., Heydari P., Design and analysis of a W-band SiGe direct-detection-based passive imaging receiver, *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 2011, **46**, 2240-2252.
- [8] Lynch J. J., Moyer H. P., Schaffner J. H., Royter Y., Sokolich M., Hughes B., Yoon Y. J., Schulman J. N., Passive millimeter-wave imaging module with preamplified zero-bias detection, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2008, **56**, 1592-1600.
- [9] Sharma P., Hudiara I. S., Singh M. L., Estimation of effective rain height at 29 GHz at amritsar (tropical region), *IEEE Transations on Antennas and Propagation*, 2007, **55**, 1463-1465.
- [10] Camps A. Tarongi J. M., Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times, *Remote Sensing*, 2010, **2**, 1826-1843.
- [11] Camps A., Noise wave analysis of Dicke and noise injection radiometers: Complete S parameter analysis and effect of temperature gradients, *Radio Science*, 2010, **45**.
- [12] Tanner A.B., Development of a high-stability water vapor radiometer, *Radio Science*, 1998, **33**, 449-462.

- [13] Takano T., Maeda T., Experiment and theoretical study of earthquake detection capability by means of microwave passive sensors on a satellite, *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters*, 2009, **6**, 107-111.
- [14] Colliander A. et al., Development and calibration of SMOS reference radiometer, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2007, **45**, 1967–1977.
- [15] Roy M., George D., Estimation of coupled noise in low noise phased array antennas, *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 2011, **59**, 1846–1854.
- [16] Estin A. J., Trembath C. L., Wells J. S., Daywitt W. J., Absolute measurement of temperatures of microwave noise sources, *IRE Trans. Instrumentation*, 1960, **9**, 209-213.
- [17] Wells J. S., Daywitt W. C., Miller C. K. S., Measurement of effective temperatures of microwave noise sources, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1964, **13**, 17-28.
- [18] Somlo P. I., Hollyway D. L., The Australian national standards laboratory X-band radiometer for the calibration of noise sources, *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 1968, **16**, 664-666.
- [19] Blundell D. J., Houghton E. W., Sinclair M. W., “Microwave noise standards in the United Kingdom”, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1972, **21**, 484-488.
- [20] Janik D., Precision broad-band RF-switched radiometer for the Megahertz and lower gigahertz range with IF attenuator”, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1983, **32**, 232-234.
- [21] Kato Y. Yokoshima I., A 4-GHz band low-noise measurement system, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1987, **36**, 60-66.
- [22] Estin A. J., Juroshek J. R., Marks R. B., Clague F. R. Allen J. W., Basic RF and microwave measurements: a review of selected programs, *Metrologia*, 1992, **29**, 135-151.
- [23] Nakano H., Kato Y., A broadband microwave radiometer using correlation technique, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**, 631-633.
- [24] Corbella I., Camps F. T. A., Duffo N., Vall-llossera M., Rautiainen K., Colliander M. M. A., Analysis of correlation and total power radiometer front-ends using noise waves, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2005, **43**, 2452-2459.
- [25] Wiatr W., Schmidt-Szalowski M., The multistate radiometer: A novel means for impedance and noise temperature measurement, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**, 486-489.

- [26] May J. W., Rebeiz G. M., Design and characterization of X-band SiGe RFICs for passive millimeter-wave imaging, *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 2010, **58**, 1420-1430.
- [27] Randa J., Gerecht E., Gu D., Billinger R. L., Precision measurement method for cryogenic amplifier noise temperatures below 5 K, *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 2006, **54**, 1180-1189.
- [28] Wait D. F., Randa J., Amplifier noise measurements at NIST, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**, 482-485.
- [29] Randa J., Billinger R. L., Rice J. L., On-wafer measurements of noise temperature, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**, 1259-1269.
- [30] Wait D. F., Radiometer equation for noise comparison radiometers, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1995, **44**, 336-339.
- [31] Wiatr W., Characterization of radiometer using eight-term linear model, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1995, **44**, 346-346.
- [32] Hersman M. S., Gene G. A., Sensitivity of the total power radiometer with periodic absolute calibration, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1981, **29**, 32-40.
- [33] Land D. V., Lewick A. P., Hand J. W., The use of the Allan deviation for the measurement of the noise and drift performance of microwave radiometers, *Measurement Science and Technologies*, 2007, **18**, 1917-1928.
- [34] Eio C., Adamson D., Randa J., Allal D., Uzdin R., Noise in 50  $\Omega$  coaxial line at frequencies up to 1 GHz, *Metrologia*, 2006, **43**, 01004.
- [35] Allal D. Achkar J., CCEM.RF-K9: International comparison of thermal noise standards between 12.4 GHz and 18 GHz (GT-RF/99-1), *Metrologia*, 2006, **43**, 01005.
- [36] Randa J. et al., International comparison of thermal noise-temperature measurements at 2, 4, and 12 GHz, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**, 174-177.
- [37] Celep M., Yaran Ş., Gülmez Y., Dolma A., Characterization of a total power radiometer, *Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.*, 2012, **20**, 870-880.
- [38] Judaschke R., Rühaak J., Determination of the correction factor of waveguide microcalorimeters in the millimeter-wave range, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2009, **58**, 1104-1108.
- [39] Benz S. P., Hamilton C. A., Application of the Josephson effect to voltage metrology, *Proc. of the IEEE*, 2004, **92**, 1617-1629.

- [40] Caryotakis G., Invited paper: the klystron: a microwave source of surprising range and endurance, *American Physics Society: Division of Plasma Physics Conference*, 1997.
- [41] Agilent Technologies, *Fundamentals of RF and microwave power measurements (AN 1449-1)*, Agilent application note, USA, 2003.
- [42] Macpherson A. C., Kerns D. M., A microwave microcalorimeter, *Rev. Sci. Instr.* 1955, 27-33.
- [43] Engen G. F., A refined X-band microwave microcalorimeter, *Journal of Research of the National Bureau of Standards-C*, 1959, **63**, 77-82.
- [44] Sucher M., Carlin H. J., Broad-band calorimeters for the measurement of low and medium level microwave power. I. Analysis and Design, *IRE Trans. on Microwave Theory and Technics*, 1958, **6**, 188-194.
- [45] Clark R. F., A coaxial calorimeter for use as a microwave power standard, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1965, **14**, 59-63.
- [46] Hollyway D. L., Muller W., The precise measurement of RF power and voltage using coaxial calorimeters and microcalorimeters, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1984, **33**, 269-275.
- [47] Agraval V. K., Kothari P. C., Aggarwal R., Bhatnagar H. M., A single-load microcalorimetric technique with newly designed X-band load for precise measurement of microwave power, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1987, **36**, 450-454.
- [48] Chung N. S., Shin J., Bayer H., Honigbaum R., Coaxial and waveguide microcalorimeters for RF and microwave power standards, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1989, **38**, 460-464.
- [49] Kang T. W., Chung N. S., Honigbaum R., Rühaak J., Stumper U., “K- and Ka-band waveguide microcalorimeters for microwave power standards, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**, 1247-1250.
- [50] Ascroft J. T., Development in coaxial power standards at NPL, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**, 647-649.
- [51] Kwon J., Kang T., Kim J., Kang J., Development of a 3.5-mm coaxial microcalorimeter for RF and microwave power standards at KRISS, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2011, **60**, 2609-2614.
- [52] Vremera E. T., Brunetti L., Oberto L., Sellone M., Power sensor calibration by implementing true-twin microcalorimeter, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2011, **60**, 2335-2340.
- [53] Cui X., Crowley T. P., Comparison of experimental techniques for evaluating the correction factor of a rectangular waveguide microcalorimeter, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2011, **60**, 2690-2695.

- [54] Ziadé F., Bergeault E., Huyart B., Kazemipour A., Realization of a calculable RF power standard in coplanar technology on alumina Substrate, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technics*, 2010, **58**, 1592-1598.
- [55] [http://kcdb.bipm.org/AppendixC/country\\_list.asp?page=1&page\\_sav=2&CountSelected=;2,SI&iservice=EM/RF.11.1.1](http://kcdb.bipm.org/AppendixC/country_list.asp?page=1&page_sav=2&CountSelected=;2,SI&iservice=EM/RF.11.1.1), (Ziyaret tarihi: 13 Kasım 2012).
- [56] Agilent Technologies, *Accurate absolute and relative power measurements using the Agilent N5531S measuring receiver system*, Agilent application note, USA, 2008.
- [57] Rohde & Schwarz, *RF level measurement uncertainties with the measuring receiver R&S FSMR*, Rohde & Schwarz, Almanya, 2006.
- [58] Kawakami T., Nagatuka A., Maeda M., Igarashi S., RF attenuation measurement system with 1-kHz voltage ratio standard, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1993, **42**, 1014-1019.
- [59] Bailey A.E., *Microwave measurements*, Peter Peregrinus Ltd. UK, 1989.
- [60] Agilent Technologies, *Fundamentals of RF and microwave power measurements (Part 2)*, Agilent application note, USA, 2006.
- [61] Brunetti L., Oberto L., Sellone M., Vremera T. E., Comparison among coaxial microcalorimeter models”, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2009, **58**, 1141-1145.
- [62] Brunetti L., Vremera T. E., New calibration method for coaxial microcalorimeters, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2005, **54**, 684- 687.
- [63] Brunetti L., Vremera T. E., A new microcalorimeter for measurements in 3.5-mm coaxial line, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2003, **52**, 320-323.
- [64] Ahmad S., Aggarwal R., Pal B., Govil A. K., Banerje P., A validation of RF power standard in the frequency range of 100 MHz to 18 GHz by an inter laboratory data comparison, *Journal of Metrology Society of India*, 2009, **24**, 247-253.
- [65] Adamson D., Miall J., Howes J., Harper M., Thompson R., A new 75-110 GHz primary power standard with reduced thermal mass, *Microwave Measurements Conference*, 2010 75th ARFTG.
- [66] Mellouet B., Velasco L., Achkar J., Fast method applied to the measurement power standartds, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, 2000.
- [67] Inoue T., Evaluation of uncertainty due to excess heating by ann adiabatic line in calorimetric measurment of RF power, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, 2000.

- [68] Fantom A., *Radio frequency and microwave power measurement*, Peter Peregrinus Ltd. UK, 1990.
- [69] Wong K., Power sensor calibration and uncertainties, *Microwave Measurements Conference*, 2002, 60th ARFTG.
- [70] Agilent Technologies, *Fundamentals of RF and microwave power measurements (Part 4)*, Agilent application note, USA, 2008.
- [71] De Vreede J. P. M., et al., International comparison for RF power in the frequency range up to 18 GHz, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2001, **50**, 409- 413.
- [72] Juroshek J. R., NIST 0.05-50 GHz direct comparison power calibration system, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, 2000.
- [73] Wu T. Y. Chua S. W., Evaluation of mismatch uncertainty in microwave power sensor calibration using Monte-Carlo method, *International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2009.
- [74] Shan Y., Chua S. W., Yan Y. K., Development of a 50 GHz coaxial direct comparison transfer microwave power sensor calibration system at NMC, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, 2010.
- [75] Agilent Technologies, *Agilent N5531S Measuring Receiver Data Sheet*, 5989-9217Y, Agilent data sheet, USA, 2009.
- [76] White D. R., et al. The Status of Johnson Noise Thermometry, *Metrologia*, 1996, **33**, 325-335.
- [77] Miller C. K. S., Daywitt W. C., Arthur M. G., Noise standards, measurements, and receiver noise definitions, *Proceedings of the IEEE*, 1967, **55**, 865-877.
- [78] Baytaroğlu, Ş., Kesikoğlu, H., Özbay, H. Ö., *Metrolojide kullanılan temel ve genel terimler sözlüğü*, Ulusal Metroloji Enstitüsü, 1994.
- [79] Pucic S. P., Derivation of the system equation for null-balanced total-power radiometer system NCS1, *J. Res. Natl. Stand. Technol.*, 1994, **99**, 55-63.
- [80] Thompson D. A, Rogers R. L., Davis J. H., Temperature compensation of total power radiometer, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technics*, 2003, **51**.
- [81] Racette P., Lang R. H., Radiometer design analysis based upon measurement uncertainty, *Radio Sci.* 2005, **40**, RS5004 doi:10.1029/2004RS003132.
- [82] Celep M., Pasif dirençsel eleman üzerinden mikrodalga güç elde edilmesi ve ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007, 232747.
- [83] BIPM, *Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008, 10-15, 2008.



- [84] Mason S. J., Feedback theory – further properties of signal flow graphs, *Proceedings of the IRE*, 1956, **44**, 920-926.
- [85] BIPM, *Uluslararası metroloji sözlüğü – Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)*, JCGM 200:2008, 2010.
- [86] Adams T. M., *G104 – A2LA Guide for Estimation of Measurement Uncertainty In Testing*, A2LA, 2002.

## **EKLER**

## EK-A

### A.1. ÖLÇÜM VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

Metrolojik olarak ölçülen bir büyüklüğün anlamlı olabilmesi için, ölçümlerde elde edilen büyüklük değerinin yanında bu büyüklüğün olası gösterebileceği aralığı ve güven düzeyini tanımlayan ölçüm belirsizliği de önem taşır. Ölçüm, bir büyüklüğe atanabilecek bir veya daha fazla büyüklük değerinin deneysel olarak elde edilme süreci, belirsizlik ise elde edilen bilgiye dayanılarak ölçülene atfedilen büyüklük değerlerinin dağılımını niteleyen, negatif olmayan sayısal parametre olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümde verilen tanımlama ve açıklamalar [83], [85] ve [86] numaralı referanslardan yararlanılarak sunulmuştur.

Ölçme işlemi şu sıralama göz önünde bulundurularak yapılır;

- a) ölçülecek nesnenin belirlenmesi,
- b) ölçülecek büyüklüğün belirlenmesi,
- c) ölçülecek yöntemin belirlenmesi,
- d) ölçümde kullanılacak cihazların seçilmesi ve ölçüm düzeneğinin kurulması,
- e) ölçme işleminin gerçekleştirilmesi,
- f) ölçme sonuçlarının değerlendirilmesi, kontrol edilmesi ve sonuçların raporlanması.

Böylece, ilgili mevcut bilgilerle birlikte, ölçülene atfedilen büyüklük değerler kümesi olan ölçümün sonucu belirlenmiş olur.

Gerçekleştirilen bir ölçümde iki tip hata tanımlanmaktadır. Bunlar, tekrarlı ölçümlerde tahmin edilemez bir şekilde değişen ölçüm hatası rastgele hata ve sabit kalan veya tahmin edilebilir şekilde değişen bileşen ise sistematik hata olarak isimlendirilmektedir. Sistematik hatalar için düzeltme yapılmadan elde edilen yalın ölçüm sonucu düzeltilmemiş sonuç olarak isimlendirilirken, düzeltilmiş sonuç ise sistematik hatalar için düzeltme yapıldıktan sonra elde edilen ölçüm sonucudur.

Aynı ölçülen büyüklüğe ait  $n$  adet ölçümden oluşan bir seri için, Eşitlik (A.1)'de verilen  $s$  parametresi deneysel standart sapmadır ve ölçüm sonuçlarının dağılımını karakterize eder.

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{A.1})$$

Burada,

$x_i$  :  $i$ . ölçüm sonucu,

$\bar{x}$  : değerlendirilen  $n$  adet sonucun aritmetik ortalamasıdır.

Yukarıda verilen standart sapma ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin hesaplanması için sıkça kullanılmaktadır. Ölçümün tekrarlanabilirliği; a) aynı ölçüm prosedürü, b) aynı operator, c) aynı ölçüm sistemi ile, d) aynı uygulama koşulları altında, e) aynı yerde, ve f) ölçümlerin aynı veya benzer nesnelere üzerinde kısa bir zaman aralığında tekrarlanarak sonuçlar arasındaki uyuma yakınlığının göstergesidir.

## A.2. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

Bir ölçümün tahmini belirsizliğinin hesaplanması genel olarak iki ana sınıfta incelenir. Bunlardan bir tanesi olan A tipi ölçüm belirsizliği, belirli ölçüm koşulları altında ölçülen büyüklük değerlerinin istatistiksel analizi ile ölçüm belirsizliği bileşeninin hesaplanmasıdır. Diğer belirsizlik hesaplama yöntemi ise, A tipi ölçüm belirsizliği hesabı dışında kalan (istatistiksel olmayan) yöntemler ile ölçüm belirsizliği bileşenlerini içeren B tipi ölçüm belirsizliği hesaplama yöntemidir. B tipi ölçüm belirsizliği hesaplama yönteminde kullanılan bilgilerle ilgili örnekler şunlardır:

- Yetkililer tarafından yayımlanmış büyüklük değerleri,
- Sertifikalı referans malzemenin büyüklük değeri,
- Kalibrasyon sertifikasından elde edilen değerler,
- Doğrulanmış bir ölçüm cihazının doğruluk sınıfından elde edilen değerler ve
- Kişisel tecrübeler ile belirlenen sınır değerlerden elde edilen bilgilere dayalı hesaplamalar.

### A.2.1. A Tipi Ölçüm Belirsizliği Hesabı

Ölçülen bir değer istatistiksel olarak analizi, ölçümün tekrarlanabilirliği ve tekrar gerçekleştirilebilirliği koşulları sonucunda elde edilen verilerden yapılabilir. Ölçümün tekrarlanabilirliği, tekrarlanabilir koşullar altında ölçüm kesinliği olarak ifade edilmektedir. Tekrar gerçekleştirilebilirlik koşulu ise; farklı yerde, farklı operator, farklı ölçüm sistemleri kullanarak ve aynı veya benzer nesnelere üzerinde tekrarlanan ölçümleri kapsayan ölçüm koşullarından her biridir. A tipi belirsizlik hesaplarında, istatistiksel standart sapmayı bulmaya yarayan bir dizi tekrar eden gözlemden yararlanılmaktadır. Sonuç olarak, Eşitlik (A.1)'de hesaplanan deneysel standart sapma, ortalamanın deneysel sapması  $\pm s$  olarak verilir ve bu değer genel olarak A tipi tahmini belirsizliği temsil eder (genelde, standart sapma ortalamasının alındığı veri sayısının kareköküne bölünmesi ile elde edilen sonuç kullanılır). A tipi belirsizlik hesaplama yönteminde kullanılan dağılım genellikle normal dağılımdır.

### A.2.2. B Tipi Ölçüm Belirsizliği Hesabı

A tipi ölçüm belirsizliği hesabı dışında kalan yöntemler ile ölçüm belirsizliği bileşenlerinin hesaplanmasıdır. B tipi ölçüm belirsizliği hesaplama yönteminde kullanılan bilgiler; daha önce yapılan ölçümlerde elde edilen veriler, ilgili malzemeler ve kullanılan cihazlar konusundaki deneyim ve daha önce edinmiş bilgiler, üretici firmanın belirttiği özellikler, kalibrasyon ve diğer sertifikalarda bulunan veriler ve el kitaplarından alınan referans verilere ilişkin belirsizliklerdir.

B tipi belirsizlik hesaplama yönteminde kullanılan dağılımlar genellikle dikdörtgen dağılım, normal dağılım ve U tipi dağılımdır.

### A.2.3. Normal (Gaussian) Dağılım

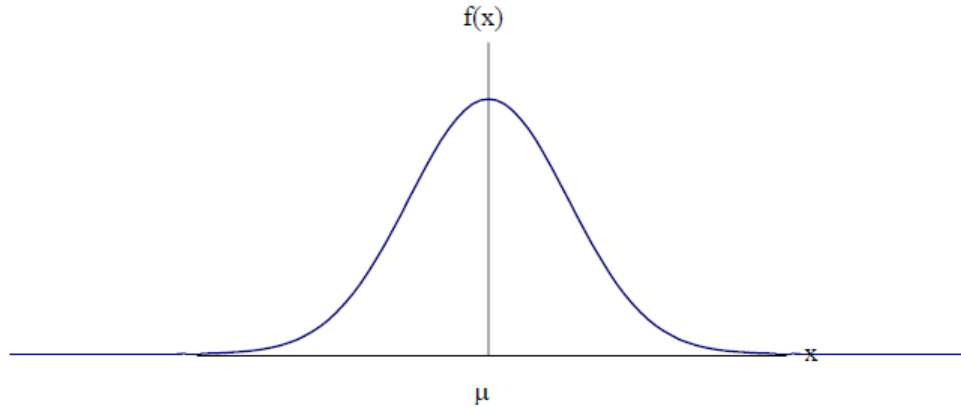
Eşitlik (A.2) ile tanımlanan bu dağılım, iki parametre ile karakterize edilir. Bunlar, dağılımın merkez noktasının yerinin hesaplandığı ortalama ( $\mu$ ) ve dağılımın genişliğinin hesaplandığı standart sapmadır ( $s$ ).

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (\text{A.2 a})$$

$$z = \frac{x - \mu}{s} \quad (\text{A.2 b})$$

Burada,  $x$  ölçüm sonucudur.

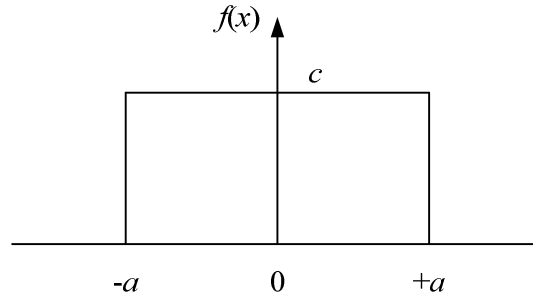


Şekil A.1. Normal dağılım

#### A.2.4. Dikdörtgen Dağılım

Bu dağılım, bir büyüklüğün değişim gösterebileceği iki sınır arasındaki bir değerde olma olasılığının, bu sınırlar içerisindeki diğer bir noktada elde edilme olasılığına eşit olduğu durumda kullanılır. Eğer sınırlar  $\pm a$  (değişim aralığı) olarak verilmiş ise, elde edilen değer  $+a$  ile  $-a$  aralığında olma olasılığının 1 olduğu anlaşılır.

Olasılık dağılım fonksiyonları genellikle normalize olarak kullanılırlar. Örneğin dikdörtgen dağılımı temsil eden  $\pm a$  sınırları tanımlayan ve  $y$  eksenini kesen sabit sayının değeri Şekil A.2’de verildiği gibi  $c$  olduğunu varsayalım.



Şekil A.2. Normalize edilmemiş dikdörtgen dağılım

Şekil A.2’de verilen  $f(x)$  fonksiyonu  $\pm a$  aralığında  $c$ ’ye eşittir. Bu dağılımın alanı Eşitlik (A.3)’de verildiği gibi hesaplanır.

$$\int_{-a}^{+a} f(x)dx = \int_{-a}^{+a} cdx = cx \Big|_{-a}^{+a} = 2ca = 1 \quad (\text{A.3})$$

Buradan  $c = \frac{1}{2a}$  elde edilir. Böylece  $x$  ekseninde merkezi 0’da olan ve  $y$  ekseninde  $\pm a$  aralığında sınırlanmış dikdörtgen dağılımın olasılık dağılım fonksiyonunun genel ifadesi  $f(x) = \frac{1}{2a}$  ile ifade edilir. Olasılık dağılım fonksiyonunun varyansı ( $s^2$ ), dağılımın genişliğinin ölçüsüdür. Şekil A.2’de verilen  $f(x)$  fonksiyonunun varyansı, normalize olasılık dağılım fonksiyonunun Eşitlik (A.4)’de verilen ifadesi kullanılarak hesaplanır (Şekil A.2’de verilen fonksiyonun ortalama değeri sıfır olduğundan Eşitlik (A.4)’e yazılmamıştır).

$$s^2 = \int x^2 f(x)dx \quad (\text{A.4})$$

Buradan, dikdörtgen olasılık dağılımının varyansı,

$$s^2 = \int_{-a}^{+a} x^2 \frac{1}{2a} dx = \frac{1}{2a} \left( \frac{x^3}{3} \right) \Big|_{-a}^{+a} = \left( \frac{1}{6a} \right) (a^3 + a^3) = \frac{2a^3}{6a} = \frac{a^2}{3} \quad (\text{A.5})$$

olarak elde edilir. Standart sapma, varyansın karekökü olduğundan dikdörtgen dağılımın standart sapması,

$$s = \sqrt{\frac{a^2}{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.6})$$

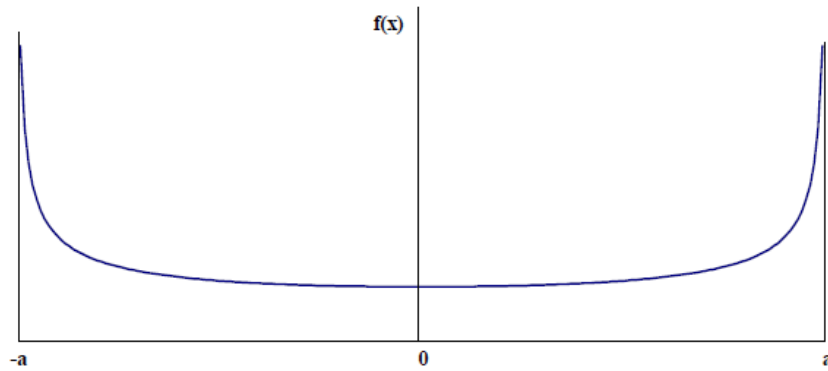
olur. Dikdörtgen dağılım için elde edilen bu standart sapma, normal dağılım için elde edilen standart sapma değeri ile sınırlanan aynı alana sahiptir.

### A.2.5. U Dağılımı

Bu dağılım, bir büyüklüğün değişim gösterebileceği aralıktaki değerlerin sınırlara yakın bulunma olasılığının daha yüksek olduğunun bilindiği durumlarda kullanılır. U dağılımı olasılık dağılım fonksiyonu Eşitlik (A.7)'de ifade edildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{a^2 - x^2}}; -a < x < +a \quad (\text{A.7})$$

Burada,  $\pm a$  fonksiyonun sınırlarıdır. Bu dağılım fonksiyonunun grafiği ise Şekil A.3'de verilmiştir.



Şekil A.3. U dağılımı

### A.2.6. Bileşik Standart Ölçüm Belirsizliği

Bir ölçüm modelinin girdi büyüklükleriyle ilişkili bütün standart ölçüm belirsizliklerinin kullanımıyla elde edilen standart ölçüm belirsizliğidir. A tipi ve B

tipi değerlendirme sonucunda uygun bir birleşimden elde edilen belirsizlik değerine bileşik belirsizlik denir. Girdi büyüklükleri  $x_i$  arasında korelasyon bulunmadığı durumda bileşik standart belirsizlik aşağıdaki ifadeye göre hesaplanmaktadır.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \quad (\text{A.8})$$

### A.2.7. Genişletilmiş Ölçüm Belirsizliği

Bileşik standart ölçüm belirsizliğinin Eşitlik (A.9)'da verildiği gibi birden büyük kapsam faktörü ile çarpımıdır.

$$U = k u_c(y) \quad (\text{A.9})$$

Kapsam faktörünün değeri hedeflenen güvenilirlik düzeyine göre seçilir. Metrolojik uygulamalarda genellikle  $k=2,0$  kullanılır. Bu değere karşılık gelen güvenilirlik düzeyi %95,45'tir.

Tablo A.1. Güvenilirlik düzeyi ve kapsam faktörü

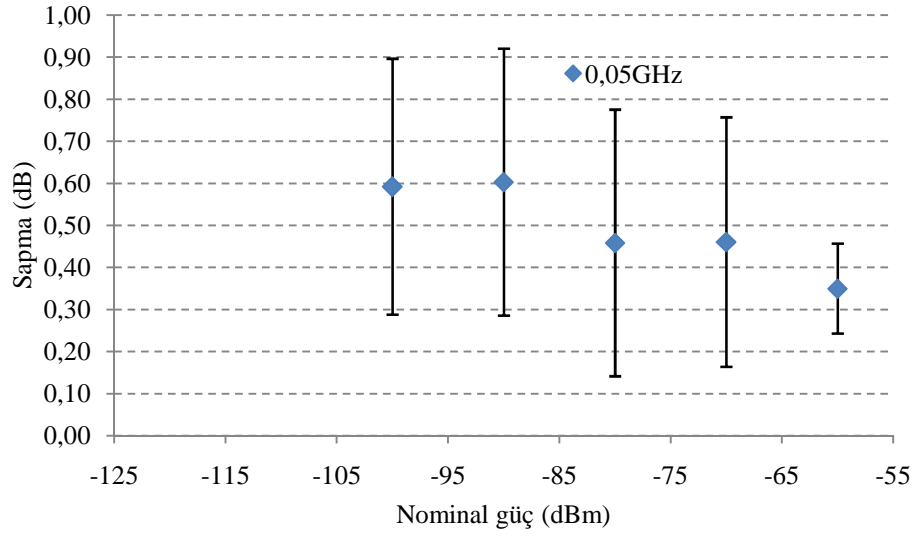
| Güvenilirlik düzeyi<br>$p$ (%) | Kapsam faktörü<br>$k$ |
|--------------------------------|-----------------------|
| 68,47                          | 1                     |
| 90                             | 1,645                 |
| 95                             | 1,960                 |
| 99                             | 2,576                 |
| 100                            | 3                     |



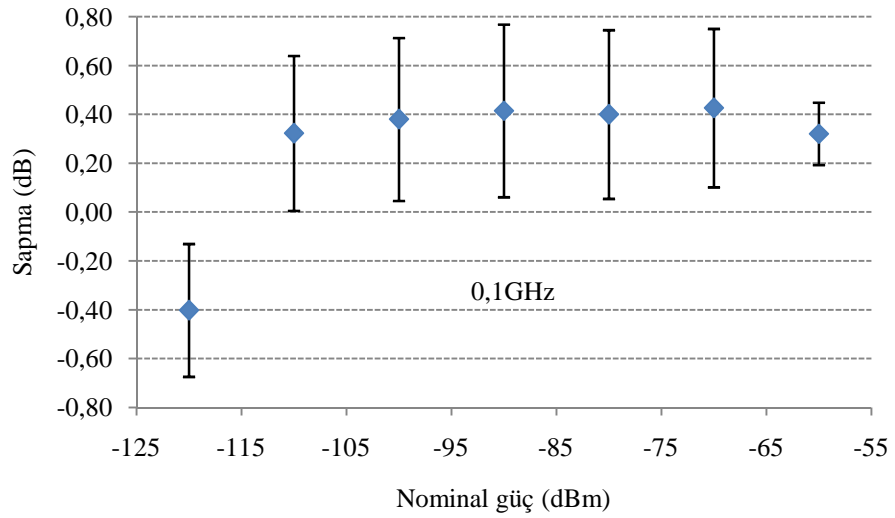
## EK-B

### B.1. ÖLÇÜLEN GÜCÜN VE BELİRSİZLİĞİNİN GRAFİKSEL GÖSTERİMİ

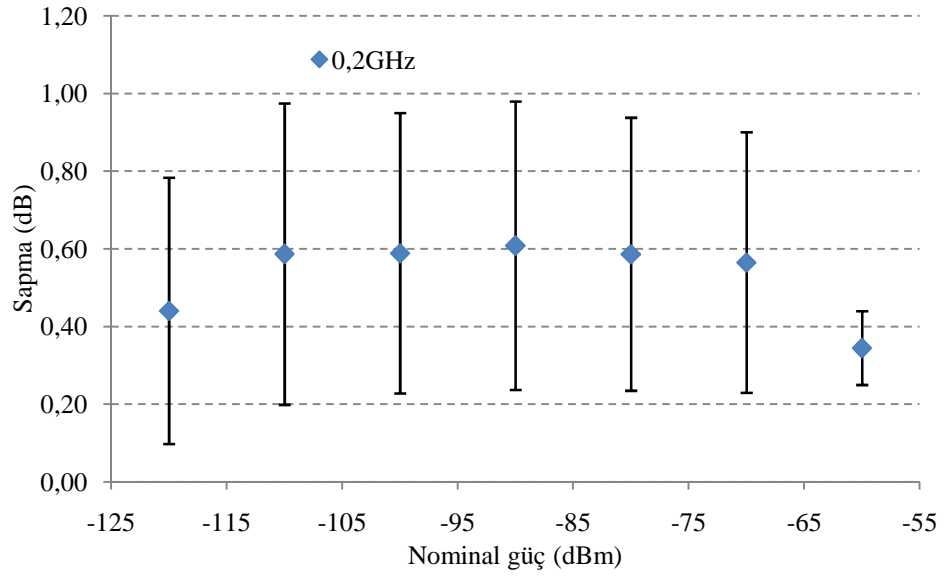
Bu çalışma ile önerilen sistem kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler sonucunda hesaplanan DUT çıkış gücünün nominal güç değerinden sapması ve bu güce ait belirsizlik değerinin grafiksel gösterimi aşağıda verilmiştir.



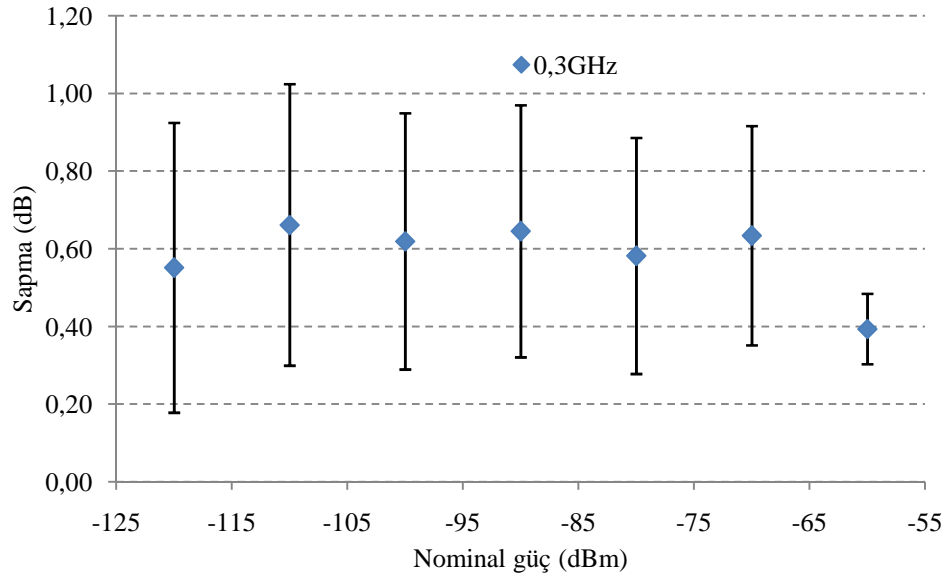
Şekil B.2. 0,05 GHz için DUT çıkış gücü



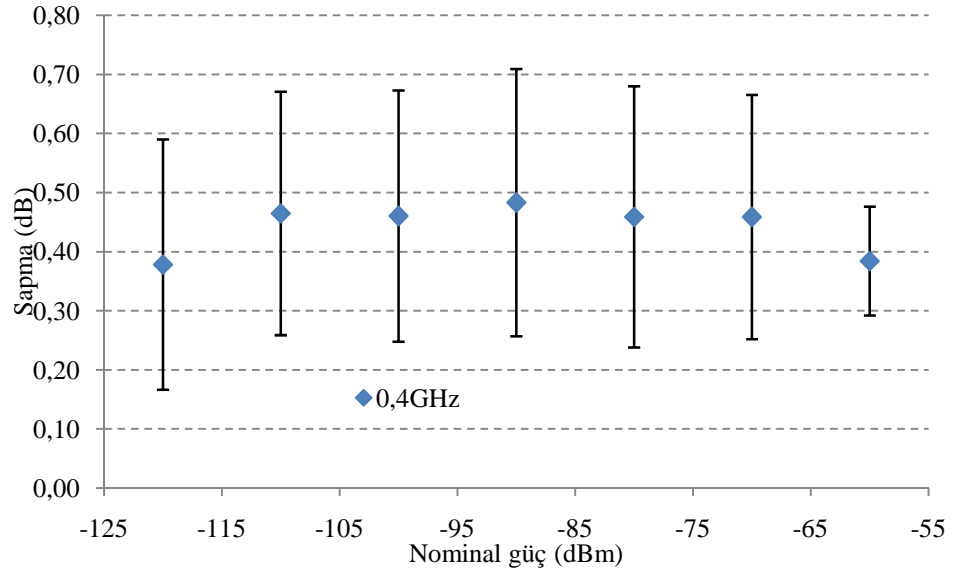
Şekil B.3. 0,1 GHz için DUT çıkış gücü



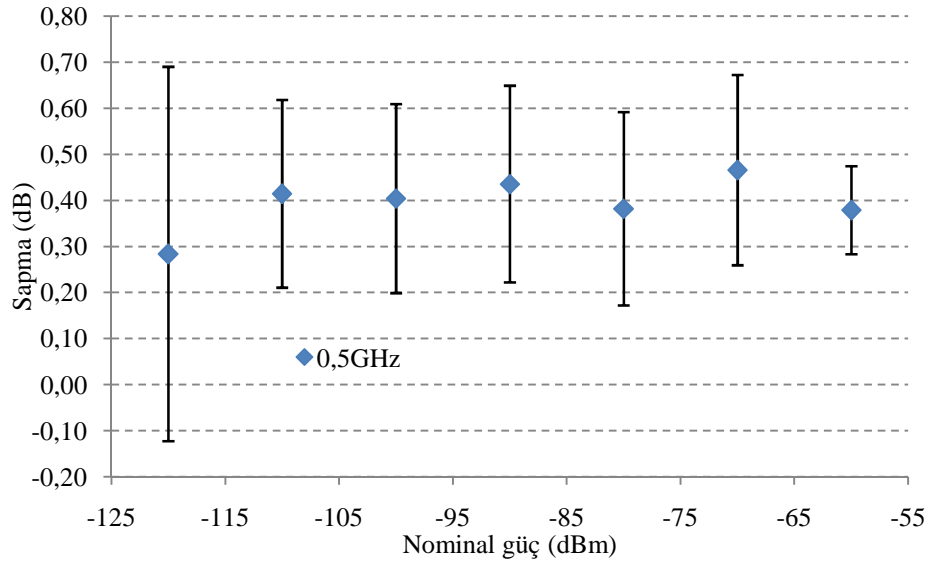
Şekil B.4. 0,2 GHz için DUT çıkış gücü



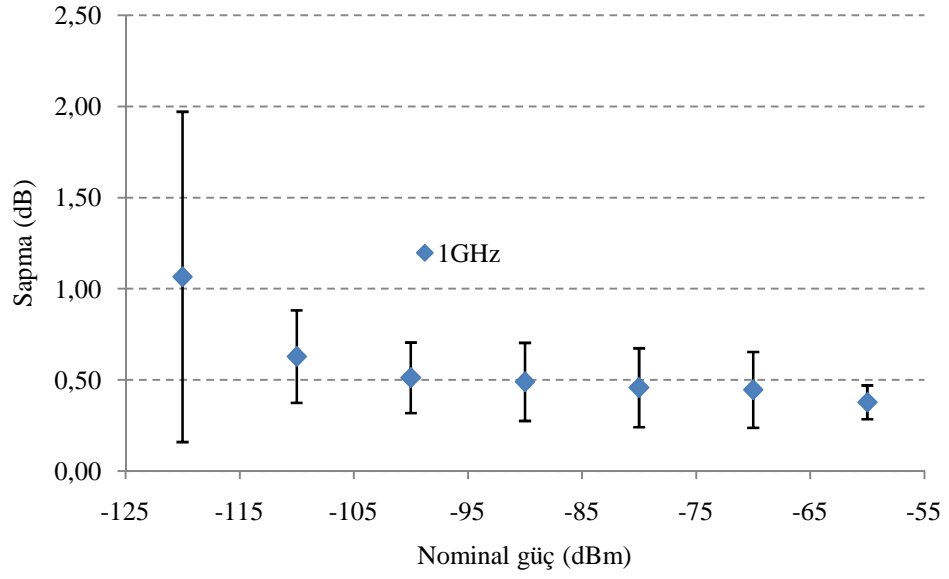
Şekil B.5. 0,3 GHz için DUT çıkış gücü



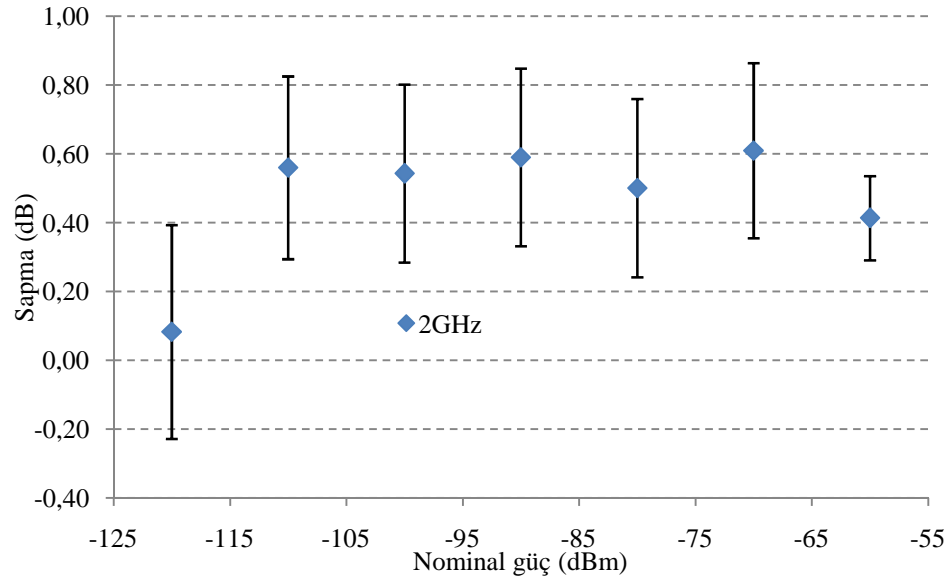
Şekil B.6. 0,4 GHz için DUT çıkış gücü



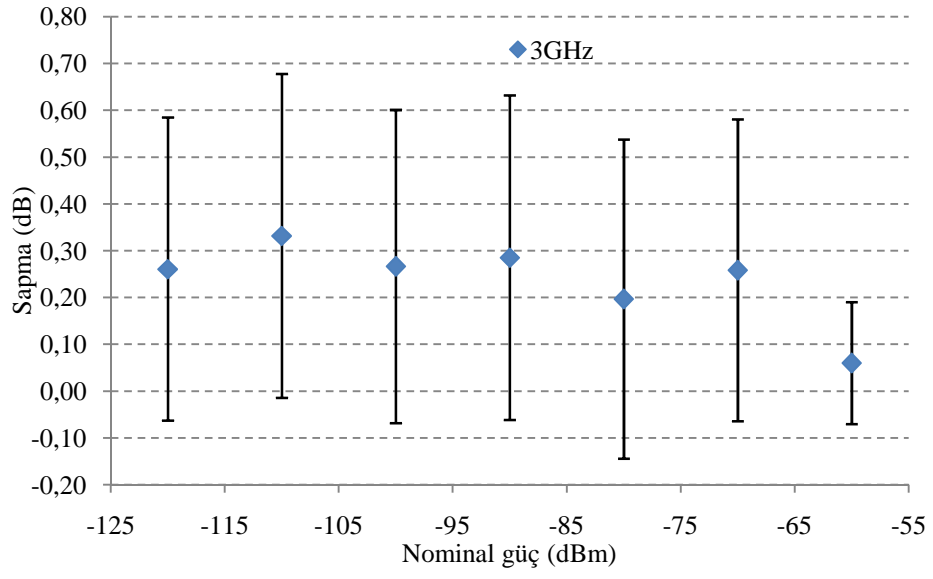
Şekil B.7. 0,5 GHz için DUT çıkış gücü



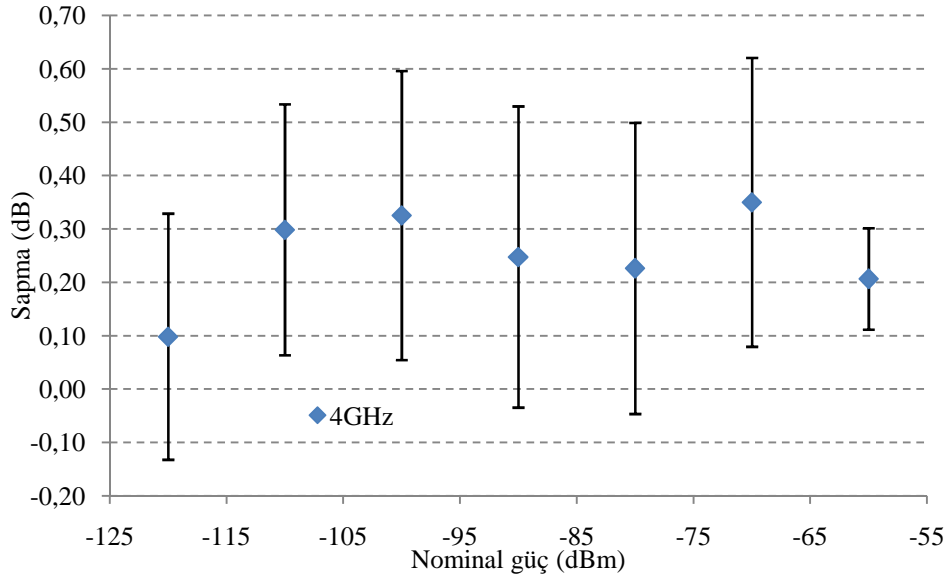
Şekil B.8. 1 GHz için DUT çıkış gücü



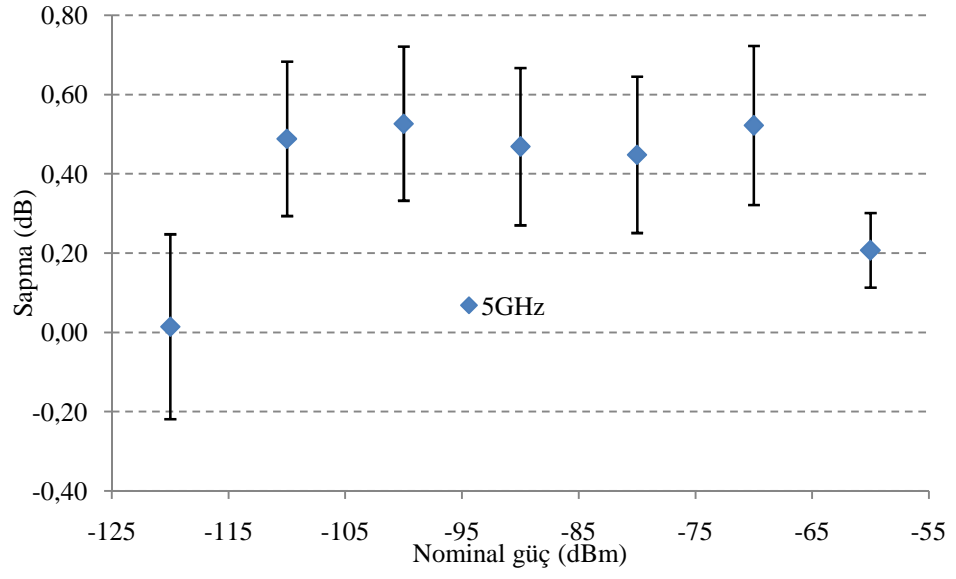
Şekil B.9. 2 GHz için DUT çıkış gücü



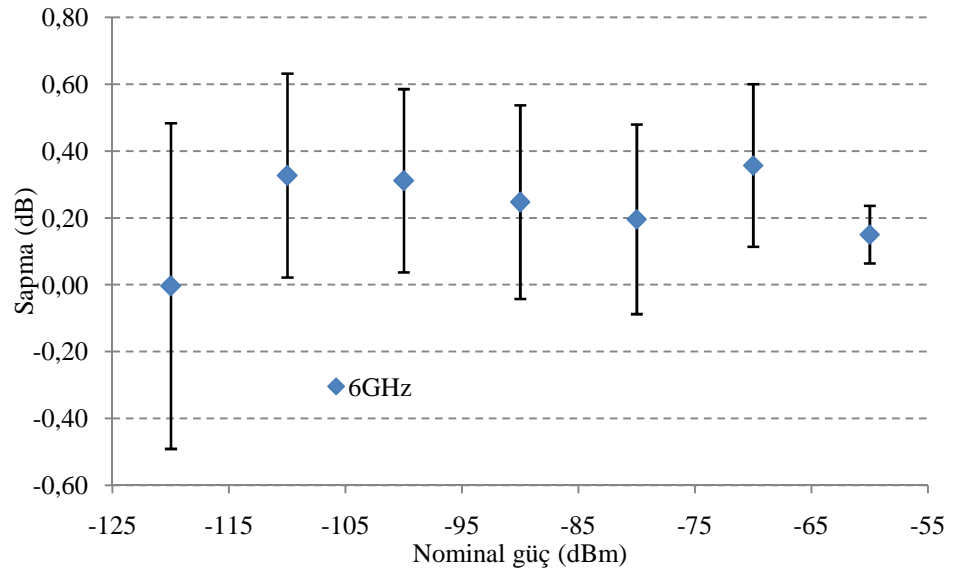
Şekil B.10. 3 GHz için DUT çıkış gücü



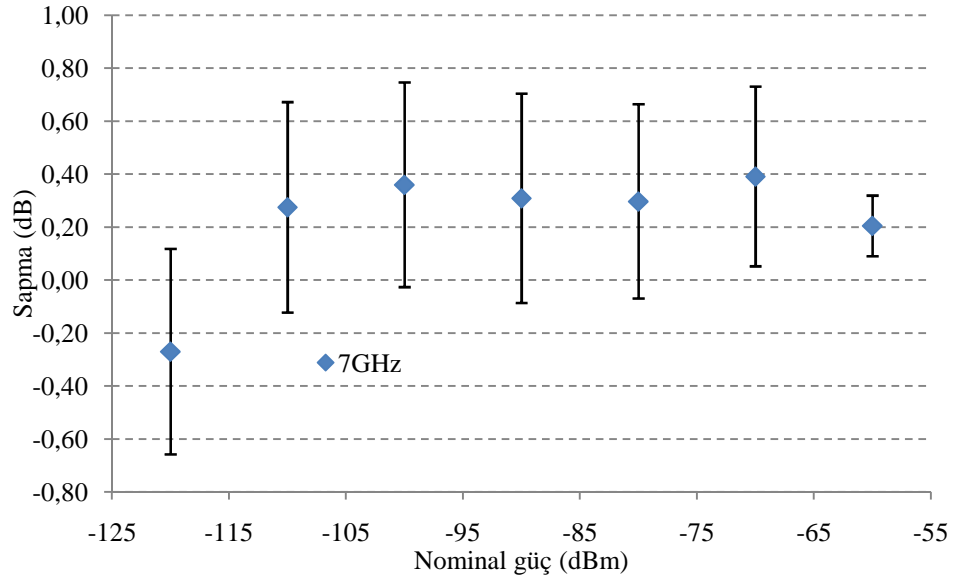
Şekil B.11. 4 GHz için DUT çıkış gücü



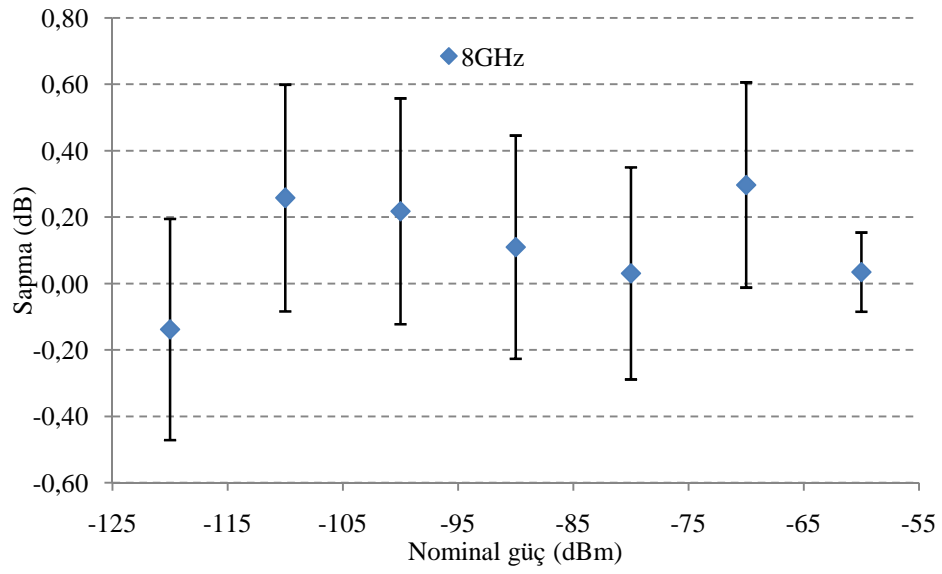
Şekil B.12. 5 GHz için DUT çıkış gücü



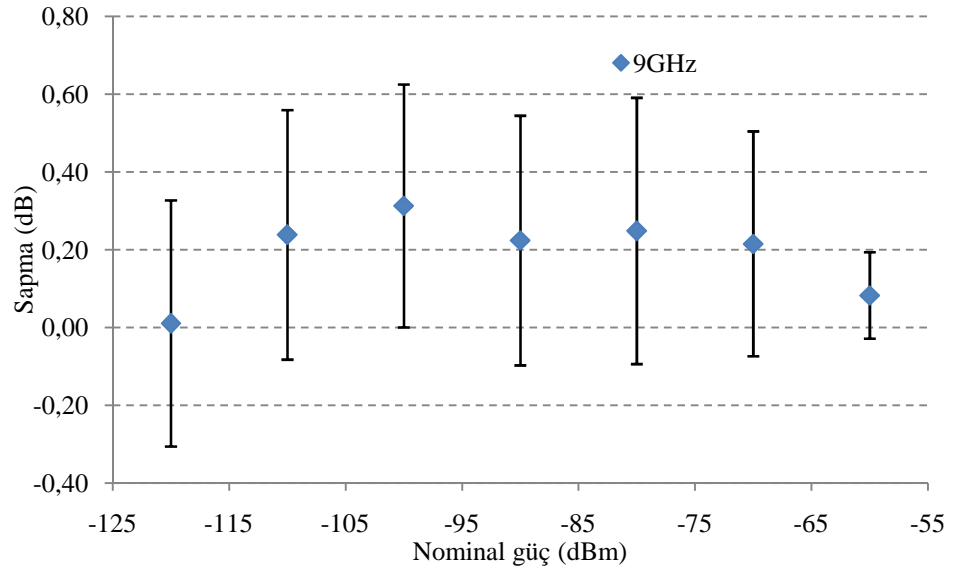
Şekil B.13. 6 GHz için DUT çıkış gücü



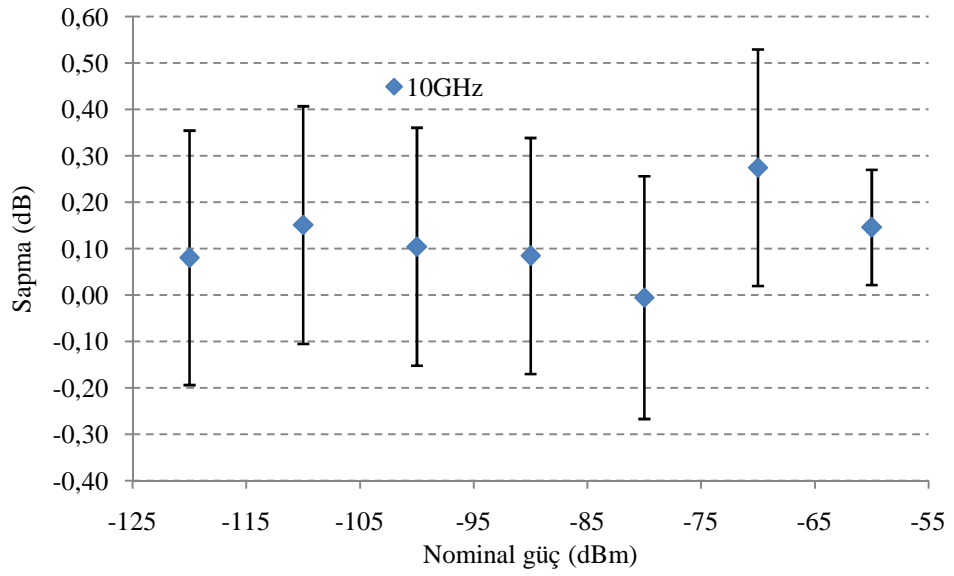
Şekil B.14. 7 GHz için DUT çıkış gücü



Şekil B.15. 8 GHz için DUT çıkış gücü

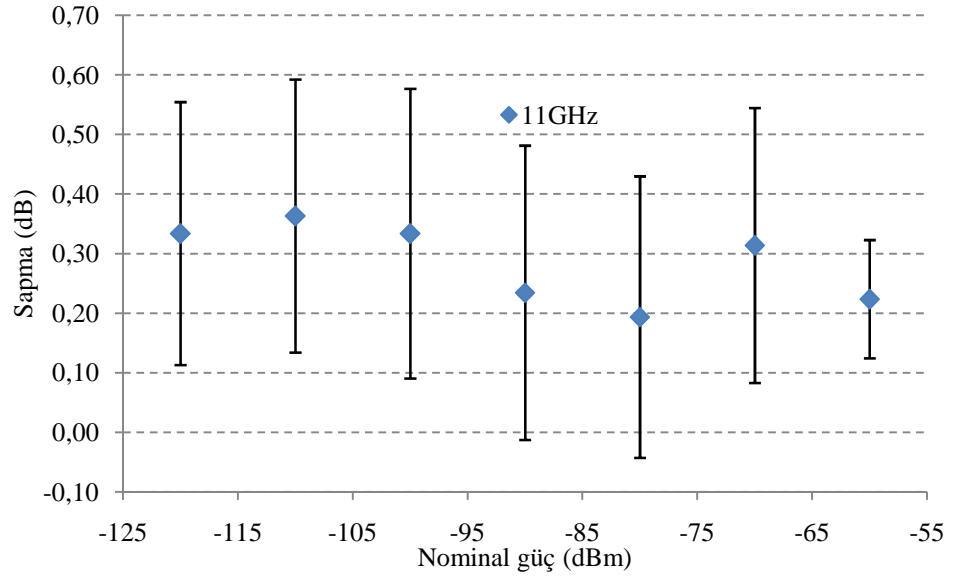


Şekil B.16. 9 GHz için DUT çıkış gücü

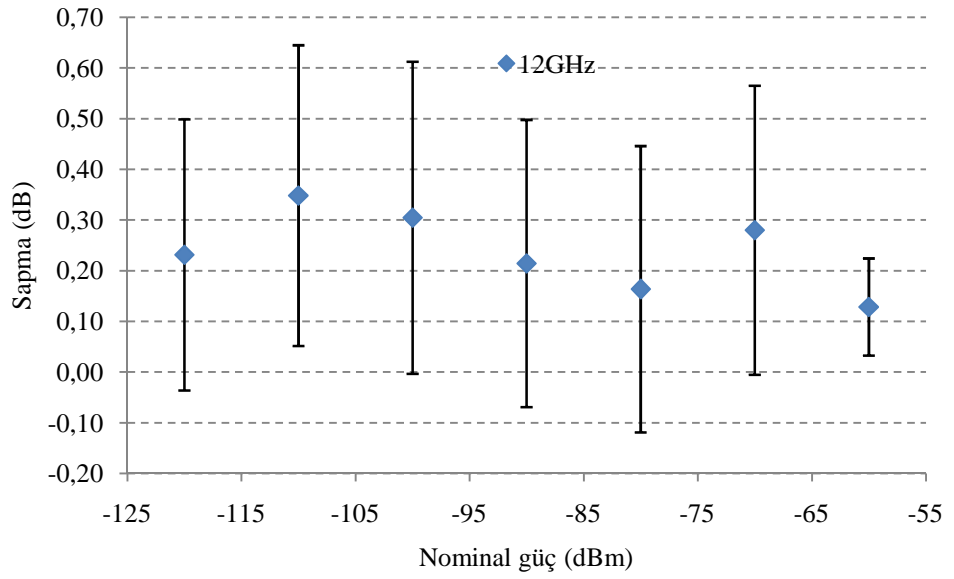


Şekil B.17. 10 GHz için DUT çıkış gücü

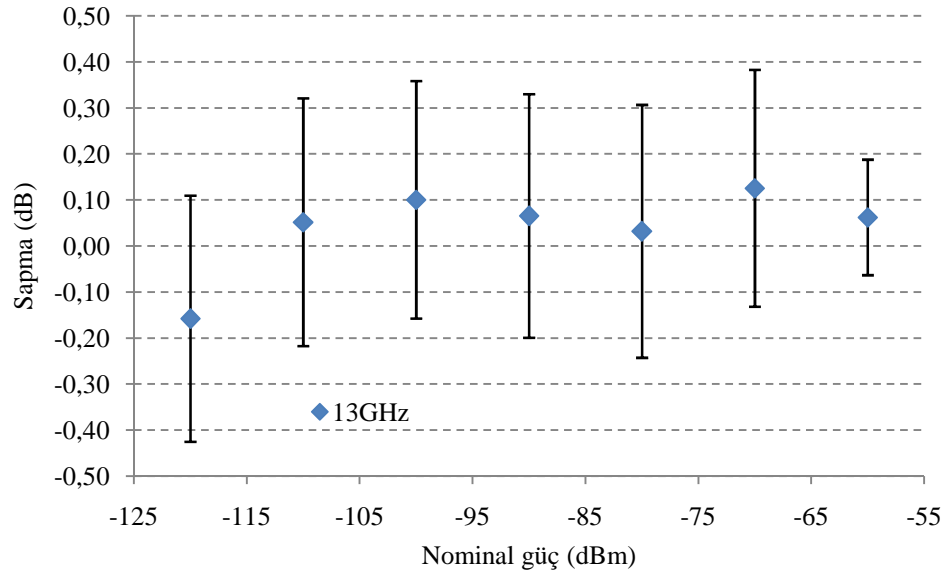




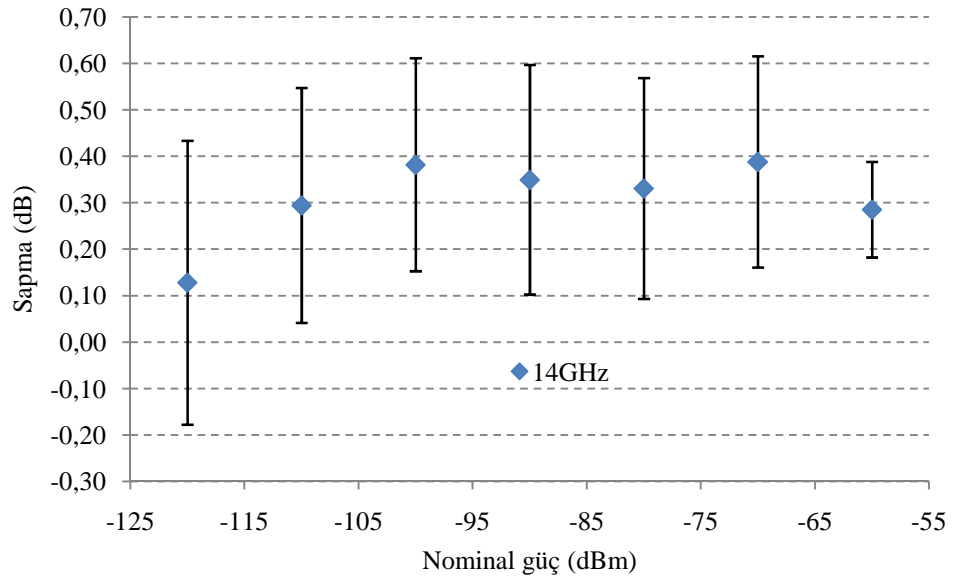
Şekil B.18. 11 GHz için DUT çıkış gücü



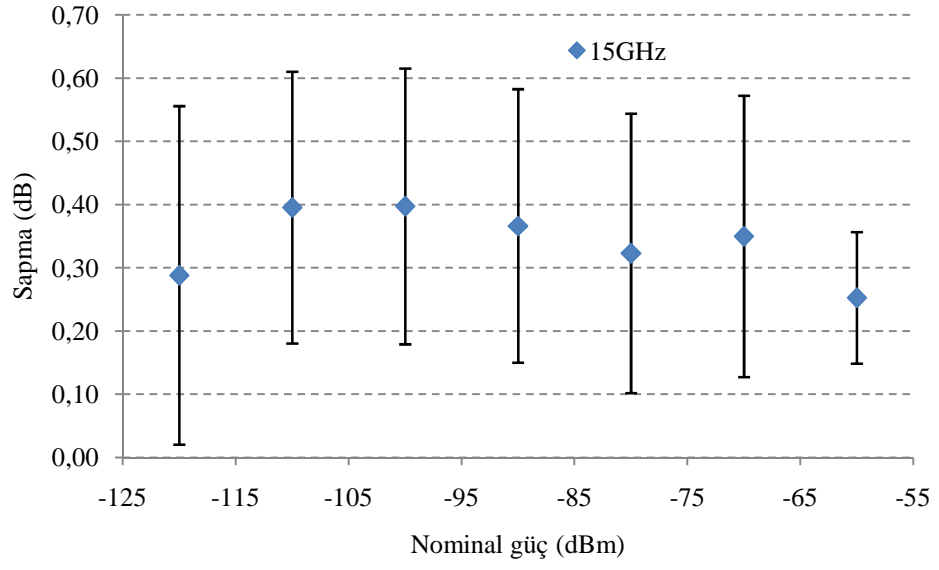
Şekil B.19. 12 GHz için DUT çıkış gücü



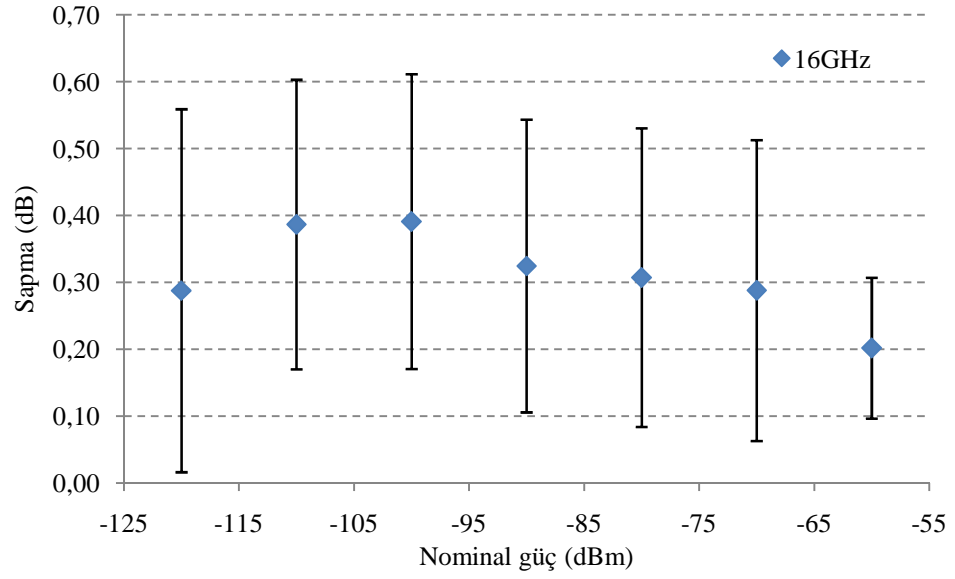
Şekil B.20. 13 GHz için DUT çıkış gücü



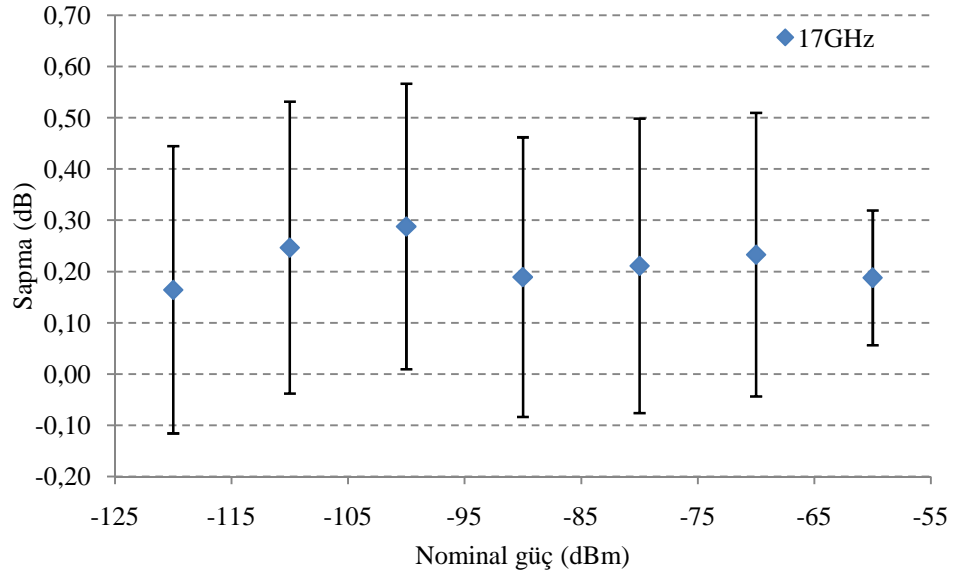
Şekil B.21. 14 GHz için DUT çıkış gücü



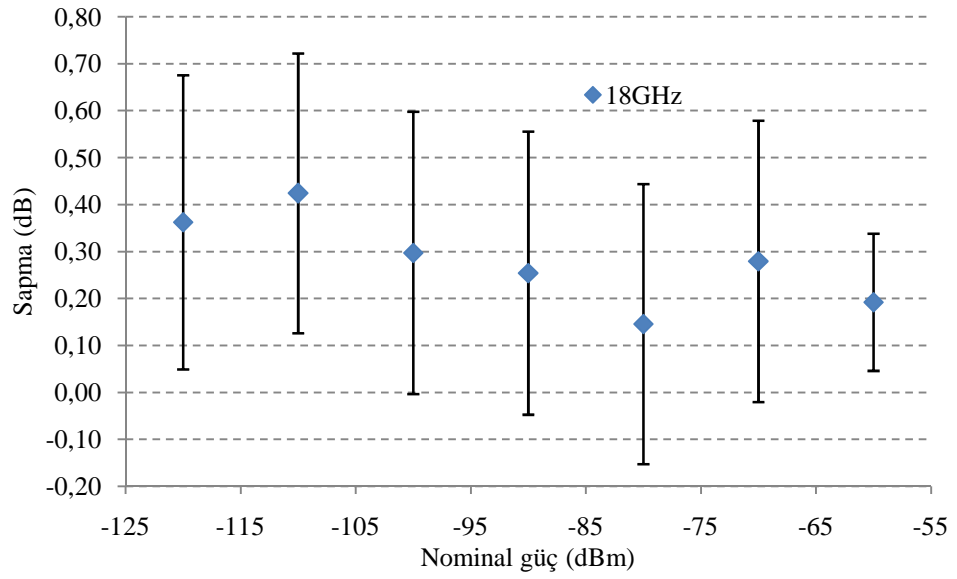
Şekil B.22. 15 GHz için DUT çıkış gücü



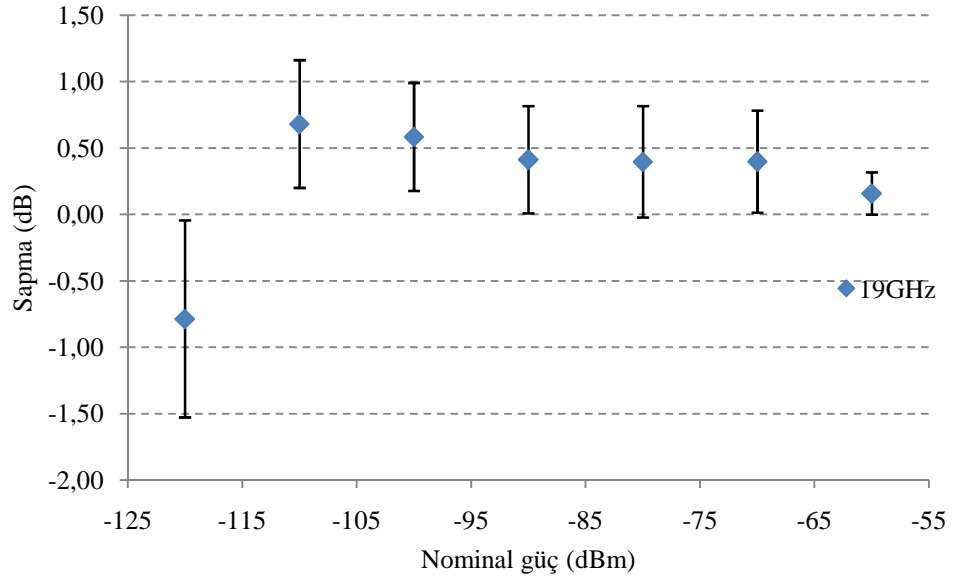
Şekil B.23. 16 GHz için DUT çıkış gücü



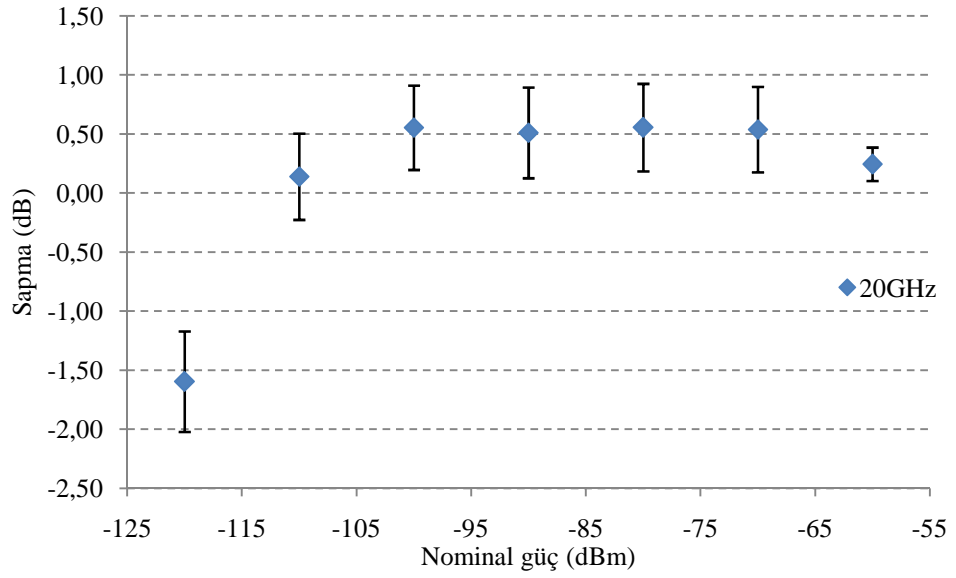
Şekil B.24. 17 GHz için DUT çıkış gücü



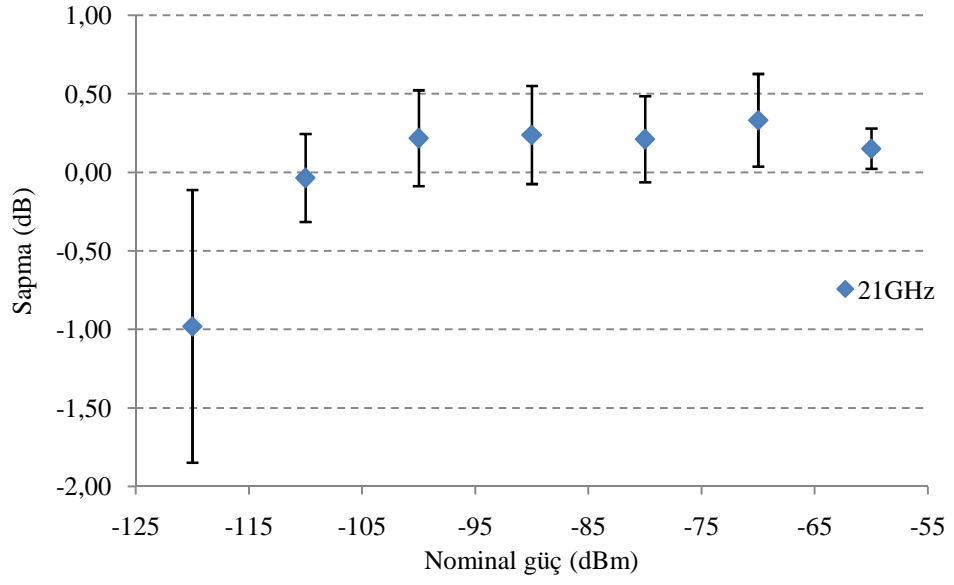
Şekil B.25. 18 GHz için DUT çıkış gücü



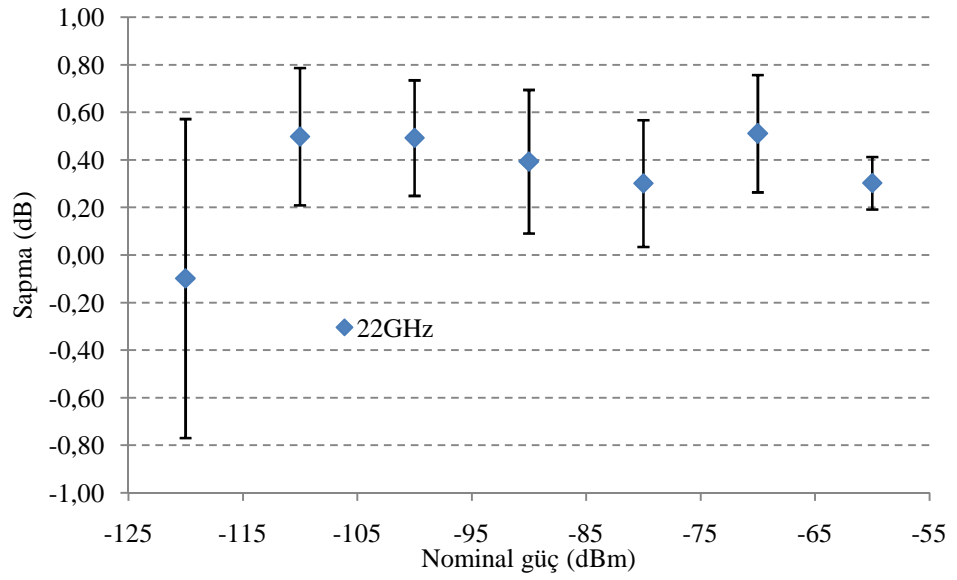
Şekil B.26. 19 GHz için DUT çıkış gücü



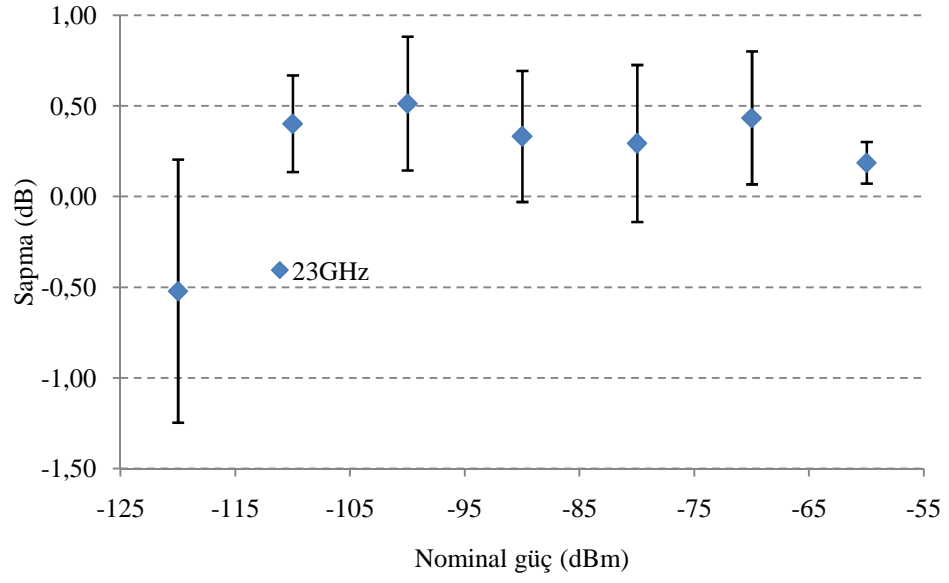
Şekil B.27. 20 GHz için DUT çıkış gücü



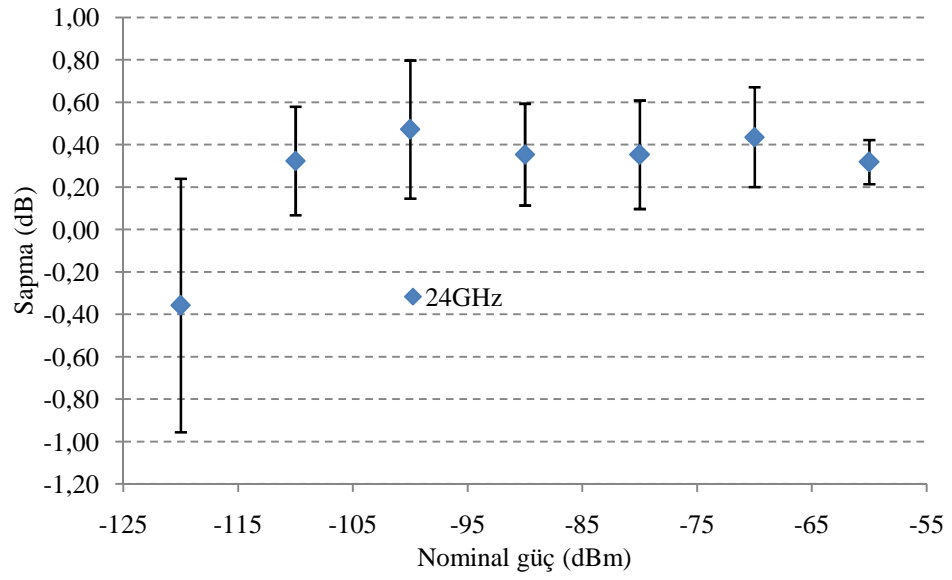
Şekil B.28. 21 GHz için DUT çıkış gücü



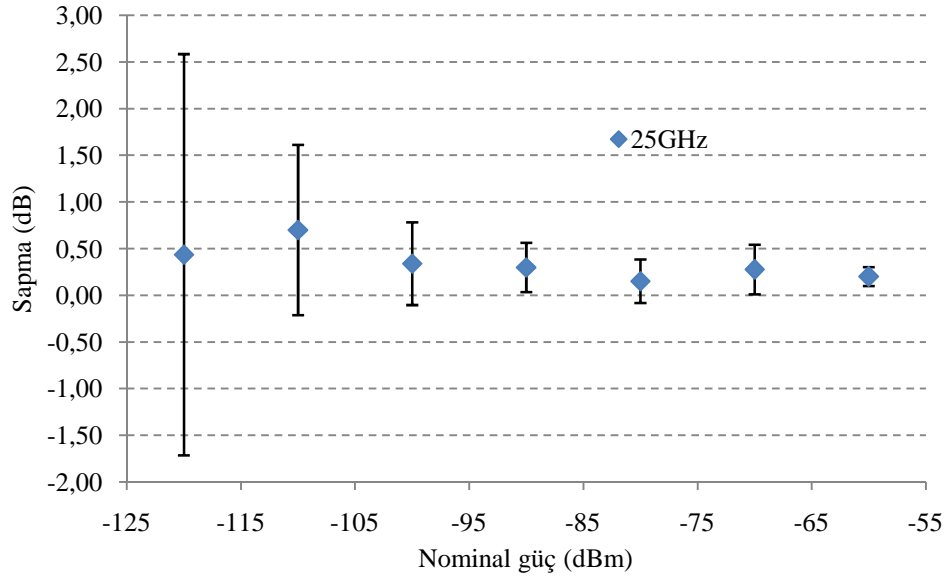
Şekil B.29. 22 GHz için DUT çıkış gücü



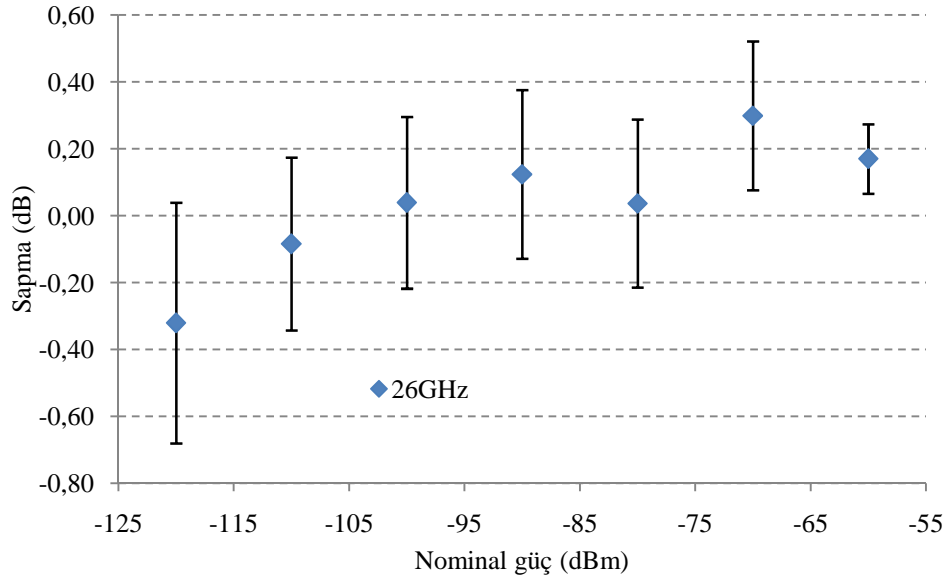
Şekil B.30. 23 GHz için DUT çıkış gücü



Şekil B.31. 24 GHz için DUT çıkış gücü

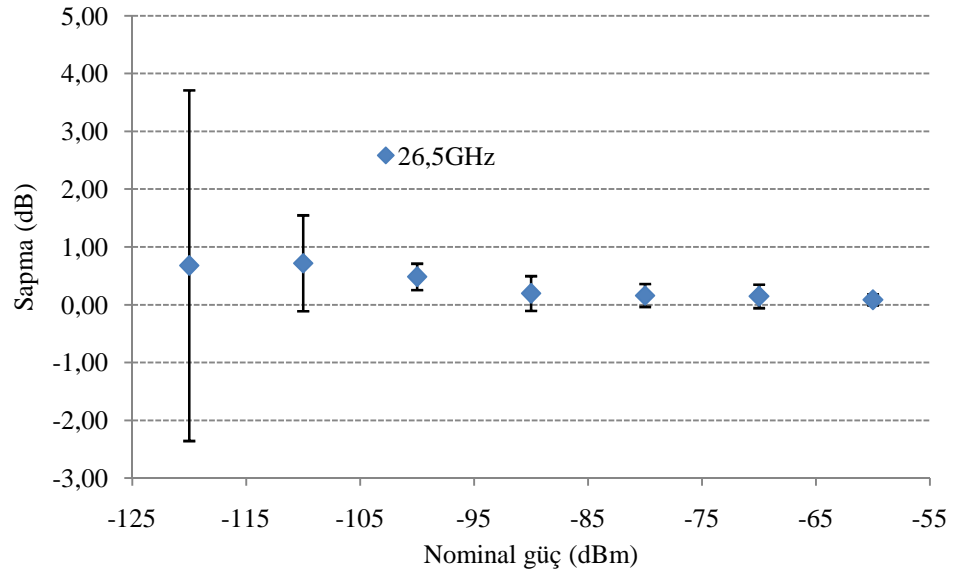


Şekil B.32. 25 GHz için DUT çıkış gücü



Şekil B.33. 26 GHz için DUT çıkış gücü





Şekil B.34. 26,5 GHz için DUT çıkış gücü

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Celep M.**, Yaran Ş., Gülmez Y., Dolma A., Characterization of a total power radiometer, *Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.*, 2012, **20**, 870-880.
- [2] **Celep M.**, Yaran Ş., Hayırlı C. Dibekçi D., Characterization of the Ku-band radiometer using CW signal, *12th Mediterranean Microwave Symposium*, İstanbul, 2012.
- [3] Hayırlı C., **Celep M.**, Yaran Ş., A 30 MHz waveguide below cut-off attenuator, *12th Mediterranean Microwave Symposium*, İstanbul, 2012.
- [4] **Celep M.**, Yaran Ş., Hayırlı C. Dibekçi D., Mikrodalga soğuk gürültü kaynağının geliştirilmesi, *URSI 6. Bilimsel Konferansı*, İstanbul, 2012.
- [5] Şen O., Çakır S., Hamid R., Çetintaş M., Çınar M., **Celep M.**, Yalıtkan destek malzemelerinin 30 MHz – 1 GHz aralığında RE102 testlerine etkisi, *URSI 6. Bilimsel Konferansı*, İstanbul, 2012.
- [6] Çınar M., Dolma A., Gülmez Y., Sakarya H., Erkan Ö., **Celep M.**, Hesaplanabilir AC direnç standardının 5 MHz'e kadar modellenmesi ve üretilmesi", *EMO Bilimsel Dergi*, 2011, **1**, 75-82.
- [7] **Celep M.**, Karacadağ H., Hamid R. ve Çetintaş M., Mobil telefonların özgül soğurma oranının (SAR) belirlenmesi, *Emanet 2011 Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri Sempozyumu*, İstanbul, 2011.
- [8] **Celep M.**, Hayırlı C., Gülmez Y., EMC testlerinde kullanılan iletim hattı kayıplarının ölçülmesi, *1. EMC Konferansı*, Doğu Üniversitesi, İstanbul, 2011.
- [9] Yaran Ş., Yılmaz C., Hayırlı C., **Celep M.**, Gülmez Y., Mikrodalga gürültü ölçümleri, *VII. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi*, İzmir, 2008.
- [10] **Celep M.**, Ulusal RF gürültü standardı, *URSI 3. Bilimsel Kongresi*, Ankara, 2006.
- [11] **Celep M.**, Yaran Ş., Dinçer H., 10mW-1W RF güç aralığında kalibrasyon faktörü ölçümü, *III. Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Eskişehir, 1999.
- [12] **Celep M.**, Yaran Ş., Altınsoy İ., Hayırlı C., UME'de birincil (primer ) RF güç ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, *III. Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Eskişehir, 1999.

- [13] **Celep M.**, Yaran Ş., Hayırlı C., Altınsoy C., UME'de 10 MHz-26,5 GHz frekans aralığında güç ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, *8. Ulusal Elektrik-Elektronik Konferansı*, Gaziantep, 1999.
- [14] Yaran Ş., Altınsoy İ., **Celep M.**, Hayırlı C., S-parametre ölçümleri, *III. Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Eskişehir, 1999.
- [15] İnce R., **Celep M.**, Yaran Ş., Assessment of the accuracy of a vector voltmeter using a network analyzer with airline and attenuation standards, *CPEM'98 Conference*, Washington D.C., 1998.

## ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Erzincan'da doğdu. İlk okulu Erzincan'da, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'de tamamladı. 1992 yılında girdiği Trakya Üniversitesi Tekirdağ Meslek Yüksek Okulu'ndan 1994 yılında birinci sırada mezun oldu. 1995 yılında Ar-Ge teknikeri olarak bir süre CEDETAŞ A. Ş.'de çalıştıktan sonra, aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi'nden Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak birinci sıradan ve 2007 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü'nden Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu.

1997 yılında teknisyen olarak işe başladığı TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (TÜBİTAK UME) halen Uzman Araştırmacı olarak çalışmaktadır. UME'de, 100 kHz – 26,5 GHz frekanslarında çalışan birincil seviye RF ve mikrodalga güç ölçme sistemi olan mikrok calorimetre'nin kurulması ve belirsizliğinin hesaplanması çalışmalarında yer aldı. Bu kapsamda birincil seviye ve ikincil seviye RF ve mikrodalga güç ölçme sistemi üzerine çalışarak, bu sistemlerin belirsizlik hesaplamaları çalışmalarında görev aldı. Mikrodalga güç ölçümlerini yapan ülkelerin uluslararası izlenebilirliğini sağlamak üzere, 1999 ve 2006 yıllarında düzenlenen uluslararası anahtar (key) ve bölgesel (EURAMET) karşılaştırmalarına Türkiye'yi temsilen UME adına katıldı. RF ve Mikrodalga empedans ve zayıflatma ölçümleri konusunda çalışmalarda bulunarak, bu ölçümlerde yoğun olarak kullanılan HP8510C Vektör Network Analizör'ün N tipi ve 3.5mm ölçümlerdeki belirsizlik hesaplamaları çalışmalarında yer aldı. RF ve mikrodalga güç ölçümleri, zayıflatma ölçümleri ve empedans ölçümleri konularında düzenlenen uluslararası karşılaştırmalardaki çalışmalarda yer aldı. 100 MHz – 1 GHz bölgesinde, Türkiye'nin dışa bağımlı olan gerilim ölçümlerinin izlenebilirliğinin mikrok calorimetre üzerinden gerçekleştirilmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirerek, bu gerilim standartlarının kalibrasyonunu UME imkanlarını kullanarak yaptı. Halen RF ve mikrodalga güç, s-parametreleri-gürültü ve SAR ölçümleri konusunda çalışmalar yapmakta olup, güç ölçümleri ve s-parametreleri konusunda UME adına eğitim ve danışmanlık hizmeti vermektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.