
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

OTOMATİK TEST SİSTEMLERİNDE GÜRÜLTÜ FİGÜRÜ ÖLÇÜMÜ

Ozan ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ozan ÖZDEMİR

30/12/2022

OTOMATİK TEST SİSTEMLERİNDE GÜRÜLTÜ FİGÜRÜ ÖLÇÜMÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ozan ÖZDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Bu tezde otomatik test sistemlerinde gürültü figürü ölçüm teknikleri üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada otomatik test sistemlerinde gürültü figürü ölçümü teorik ve pratik uygulamalar ile gerçekleştirilmiştir. 7-14 GHz heterodin alıcı; RF yükselteç, filtre, mikser kullanılarak tasarlanmıştır. Her bir frekans için sistemin Y faktörü ve kazanç yöntemi kullanılarak gürültü figürü değerleri ölçülmüştür. Ayrıca bu yöntemlere ek olarak, yine Y faktörü yöntemi olan, ancak otomatik test düzeneğinde spektrum analizörün gürültü figürü ölçme seçeneği yöntemi yerine, gürültü kaynağının güç kaynağı ile kontrol edilmesi olan başka özgün bir ölçüm kurulumu önerilmiştir. Yöntemlerin analizine de çalışmada yer verilmiştir. Gürültü figürü ölçüm yazılımı Labwindows/CVI kullanılarak geliştirilmiştir. Sistem içinde yer alan tüm birimlerin kayıpları ve gürültü figürleri tek tek ölçülmüştür ve sonrasında "Kaskat Yapılı Sistemlerde Gürültü Figürü.exe" yazılım programı ile sistemin gürültü değeri hesaplanmıştır. Gürültü figürü değerleri yukarıda bahsedilen iki yöntemle de ölçülmüş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Karmaşık test düzeneğinin ölçümlere etkisini incelemek için anahtarlama Radyo Frekans (RF) matrisi geliştirilmiş ve gürültü figürü değerleri her iki yöntem kullanılarak tekrar ölçülmüştür. Y faktörü yönteminin bu alıcı için kazanç yöntemine göre daha uygun ve doğru bir yöntem olduğu görülmüştür. Gürültü üretecinin güç kaynağı tarafından kontrol edilmesi sayesinde kalibrasyona ihtiyaç duyulmadan daha fazla verinin incelendiği görülmüştür. Bu yöntem sayesinde hızlı ve güvenilir sonuçlar alınmış, yöntemin otomatik test sistemi için daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 90516
Anahtar Kelimeler : Gürültü, Gürültü figürü, Y-faktör yöntemi, Kazanç yöntemi
Sayfa Adedi : 86
Danışman : Prof. Dr. Nursel AKÇAM

NOISE FIGURE MEASUREMENT WITH AUTOMATIC TEST SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Ozan ÖZDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2022

ABSTRACT

In this thesis, noise figure measurement techniques in automatic test systems have been studied. In the study, noise figure measurement in automatic test systems was carried out with theoretical and practical applications. 7-14 GHz heterodyne receiver; It is designed using RF amplifier, filter, mixer. For each frequency, noise figure values were measured by using the system's Y factor and gain method. In addition to these methods, another measurement setup, which is the Y factor method, but instead of the noise figure measurement option of the spectrum analyzer in the automatic test setup, is to control the noise source with the power source. Analysis of the methods is also included in the study. It was developed using the noise figure measurement software Labwindows/CVI. The losses and noise figures of all units in the system were measured one by one, and then the noise value of the system was calculated with the “Kaskat Yapılı Sistemlerde Gürültü Figürü.exe” software program. Noise figure values were measured by both methods mentioned above and the results were compared. In order to examine the effect of the complex test setup on the measurements, the switching Radio Frequency (RF) matrix was developed, and the noise figure values were re-measured using both methods. It has been seen that the Y factor method is a more suitable and accurate method for this receiver than the gain method. Thanks to the control of the noise generator by the power supply, it has been observed that more data can be examined without the need for calibration. Thanks to this method, fast and reliable results were obtained, and it was observed that the method was more suitable for the automatic test system.

Science Code : 90516
Key Words : Noise figure, Noise, Cascaded noise figure, Y-factor method, Gain method
Page Number : 86
Supervisor : Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans yolculuğumuz ders aşamasıyla başlayan, teze hazırlık ve tez yazım sürecinin her aşamasında bana destek olan, bilgi birikimi ile yol gösteren, sabrıyla güler yüzüyle yanımda duran Sayın Prof. Dr. Nursel AKÇAM'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Tezimde kullandığım ölçümler süresince TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN test alt yapısını kullanmam konusunda her türlü desteği veren İLTAREN yönetimine, proje yürütücüme, birim amirime ve entegrasyon ve test mühendisliği çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Özellikle tez süresince bilgi ve birikimini büyük bir özveriyle paylaşan Uğur KARAKAŞ'a teşekkür ederim. Bugünlerde olmamı sağlayan, akademi hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Kadriye ÖZDEMİR ve babam Hamdi ÖZDEMİR'e, sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım. Tez yazım sürecinde bana her türlü desteği veren, anlayışla karşılayan sevgili eşim Arife Şeyda ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. GÜRÜLTÜ VE GÜRÜLTÜ FİGÜRÜ 5

2.1. Gürültü 5

2.1.1. Termal (ısıl) gürültü 5

2.1.2. Atım gürültüsü 5

2.1.3. Faz gürültüsü 5

2.1.4. Beyaz gürültü 6

2.2. Gürültü Figürü 6

2.2.1. Çok katlı (kaskatlı) sistemlerde gürültü figürü 7

2.3. Duyarlılık ve Dinamik Alan 8

2.3.1. Duyarlılık 8

2.3.2. Dinamik alan 8

3. OTOMATİK TEST SİSTEMLERİ 9

3.1. Donanım Araçları 10

3.1.1. Network analizör 10

3.1.2. Spektrum / sinyal analizör 11

3.1.3. Sinyal üreteci 11

Sayfa

3.1.4. RF anahtarlama birimleri 12

4. TEST SİSTEMLERİNDE GÜRÜLTÜ FİGÜRÜ ÖLÇÜMÜ 13

4.1. Gürültü Figürü Ölçüm Metotları 13

4.1.1. Kazanç metodu 14

4.1.2. Y-Faktör metodu 14

5. SİMÜLASYON VE UYGULAMA 17

5.1. Simülasyon 18

5.2. Ölçüm 1: Spektrum Analizör ve Analizör Opsiyonu ile 26

5.3. Ölçüm 2: Y-Faktör Metodu Alternatif Test Düzeneği ile 36

5.4. Ölçüm 3: Kazanç Metodu ile 46

5.5. Ölçüm 4: Y- Faktör Metodu ile Anahtarlama Birimi Eklenerek 56

5.6. Ölçüm 4: Kazanç Metodu ile Anahtarlama Birimi Eklenerek 65

5.7. Farklı Ölçüm Metotları Sonuçlarının Karşılaştırılması 75

6. SONUÇ 77

KAYNAKLAR 81

ÖZGEÇMİŞ 85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Gürültü figürü ölçüm teknikleri avantaj ve dezavantajları 14

Çizelge 5.1. Gürültü üreteci AGO değerleri 18

Çizelge 5.2. Birimlerin kazanç / kayıp değerleri 25

Çizelge 5.3. Spektrum analizör ve analizör özelliği ile alınan ölçüm sonuçları 27

Çizelge 5.4. Alternatif test düzeneği ile alınan gürültü figürü ölçüm sonuçları 37

Çizelge 5.5. Kazanç metodu ile alınan gürültü figürü ölçümleri 47

Çizelge 5.6. Test düzeneğine anahtarlama birimi eklenerek alınan ölçümler 57

Çizelge 5.7. Test düzeneğine anahtarlama birimi eklenerek alınan ölçümler 67

Çizelge 5.8. Test sonuçları genel tablosu 76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Filtre, düşük gürültülü yükselteç, dijital ayarlanabilir zayıflatıcı, mikser ve lokal osilatöre sahip bir süperheterodin almaç örneği 1

Şekil 1.2. Ölçüm alınan cihazın blok diyagramı 3

Şekil 2.1. Sistemin sinyal- gürültü oranı 6

Şekil 2.2. İki katlı sistem örneği 7

Şekil 3.1. Otomatik test düzeneği örneği 9

Şekil 3.2. İki kanallı network analizör görseli 10

Şekil 3.3. Spektrum analizör görseli 11

Şekil 3.4. Sinyal üreteci görseli 11

Şekil 3.5. On iki kanallı RF anahtarlama birimi örneği 12

Şekil 4.1. Otomatik test sistemi blok diyagramı 13

Şekil 4.2. Kazanç metodu test düzeneği örneği 14

Şekil 4.3. Y- Faktör ölçüm düzeneği 15

Şekil 4.4. Test düzeneği: kalibrasyon 15

Şekil 4.5. Test düzeneği: ölçüm 16

Şekil 4.6. Önerilen test düzeneği 16

Şekil 5.1. Ölçüm düzeneği ve test cihazları 17

Şekil 5.2. RF yükselteç S21 kazanç ölçümü 18

Şekil 5.3. Filtre biriminin S21 ölçümleri 19

Şekil 5.4. 7 GHz mikser ölçümü -19.17 dBm (giriş gücü -10 dBm) 19

Şekil 5.5. 8 GHz mikser ölçümü -20.19 dBm (giriş gücü -10 dBm) 20

Şekil 5.6. 9 GHz mikser ölçümü -21.55 (giriş gücü -10 dBm) 20

Şekil 5.7. 10 GHz mikser ölçümü -20.81 dBm (giriş gücü -10 dBm) 21

Şekil 5.8. 11 GHz mikser ölçümü -18.85 dBm (giriş gücü -10 dBm) 21

Şekil 5.9. 12 GHz mikser ölçümü -17.79 dBm (giriş gücü -10 dBm) 22

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.10. 13 GHz mikser ölçümü -17.44 dBm (giriş gücü -10 dBm) 22

Şekil 5.11. 14 GHz mikser ölçümü -16.43 dBm (giriş gücü -10 dBm) 23

Şekil 5.12. RF yükselteç- Mikser arası RF kablo 23

Şekil 5.13. Mikser- Filtre arası RF kablo 24

Şekil 5.14. Filtre çıkışı RF kablo 24

Şekil 5.15. 7 GHz gürültü figürü hesabı 25

Şekil 5.16. 13 GHz gürültü figürü hesabı 26

Şekil 5.17. Spektrum analizör özelliği ile gürültü figürü ölçme test düzeneği 27

Şekil 5.18. 7 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 28

Şekil 5.19. 7 GHz gürültü figürü ölçümü 28

Şekil 5.20. 8 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 29

Şekil 5.21. 8 GHz gürültü figürü ölçümü 29

Şekil 5.22. 9 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 30

Şekil 5.23. 9 GHz gürültü figürü ölçümü 30

Şekil 5.24. 10 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 31

Şekil 5.25. 10 GHz gürültü figürü ölçümü 31

Şekil 5.26. 11 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 32

Şekil 5.27. 11 GHz gürültü figürü ölçümü 32

Şekil 5.28. 12 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 33

Şekil 5.29. 12 GHz gürültü figürü ölçümü 33

Şekil 5.30. 13 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 34

Şekil 5.31. 13 GHz gürültü figürü ölçümü 34

Şekil 5.32. 14 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon 35

Şekil 5.33. 14 GHz gürültü figürü ölçümü 35

Şekil 5.34. Y- Faktör alternatif olarak kurulacak test düzeneği 36

Şekil 5.35. Y-faktör alternatif kurulan test düzeneği 37

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.36. 7 GHz Pcold ölçüm değeri 38
Şekil 5.37. 7 GHz Phot ölçüm değeri 38
Şekil 5.38. 8 GHz Pcold ölçüm değeri 39
Şekil 5.39. 8 GHz Phot ölçüm değeri 39
Şekil 5.40. 9 GHz Pcold ölçüm değeri 40
Şekil 5.41. 9 GHz Phot ölçüm değeri 40
Şekil 5.42. 10 GHz Pcold ölçüm değeri 41
Şekil 5.43. 10 GHz Phot ölçüm değeri 41
Şekil 5.44. 11 GHz Pcold ölçüm değeri 42
Şekil 5.45. 11 GHz Phot ölçüm değeri 42
Şekil 5.46. 12 GHz Pcold ölçüm değeri 43
Şekil 5.47. 12 GHz Phot ölçüm değeri 43
Şekil 5.48. 13 GHz Pcold ölçüm değeri 44
Şekil 5.49. 13 GHz Phot ölçüm değeri 44
Şekil 5.50. 14 GHz Pcold ölçüm değeri 45
Şekil 5.51. 14 GHz Phot ölçüm değeri 45
Şekil 5.52. Kazanç metodu için kurulacak test blok şema 46
Şekil 5.53. Kazanç metodu için kurulan test düzeneği 47
Şekil 5.54. 7 GHz kazanç ölçüm değeri 48
Şekil 5.55. 7 GHz Pcold ölçüm değeri 48
Şekil 5.56. 8 GHz kazanç ölçüm değeri 49
Şekil 5.57. 8 GHz Pcold ölçüm değeri 49
Şekil 5.58. 9 GHz kazanç ölçüm değeri 50
Şekil 5.59. 9 GHz Pcold ölçüm değeri 50
Şekil 5.60. 10 GHz kazanç ölçüm değeri 51
Şekil 5.61. 10 GHz Pcold ölçüm değeri 51

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.62. 11 GHz kazanç ölçüm değeri 52
Şekil 5.63. 11 GHz Pcold ölçüm değeri 52
Şekil 5.64. 12 GHz kazanç ölçüm değeri 53
Şekil 5.65. 12 GHz Pcold ölçüm değeri 53
Şekil 5.66. 13 GHz kazanç ölçüm değeri 54
Şekil 5.67. 13 GHz Pcold ölçüm değeri 54
Şekil 5.68. 14 GHz kazanç ölçüm değeri 55
Şekil 5.69. 14 GHz Pcold ölçüm değeri 55
Şekil 5.70. Anahtarlama matrisi ile kurulacak test ölçüm düzeneği..... 56
Şekil 5.71. Anahtarlama birimi eklenerek kurulan test ölçüm düzeneği 56
Şekil 5.72. 7 GHz Pcold ölçüm değeri 57
Şekil 5.73. 7 GHz Phot ölçüm değeri 58
Şekil 5.74. 8 GHz Pcold ölçüm değeri 58
Şekil 5.75. 8 GHz Phot ölçüm değeri 59
Şekil 5.76. 9 GHz Pcold ölçüm değeri 59
Şekil 5.77. 9 GHz Phot ölçüm değeri 60
Şekil 5.78. 10 GHz Pcold ölçüm değeri 60
Şekil 5.79. 10 GHz Phot ölçüm değeri 61
Şekil 5.80. 11 GHz Pcold ölçüm değeri 61
Şekil 5.81. 11 GHz Phot ölçüm değeri 62
Şekil 5.82. 12 GHz Pcold ölçüm değeri 62
Şekil 5.83. 12 GHz Phot ölçüm değeri 63
Şekil 5.84. 13 GHz Pcold ölçüm değeri 63
Şekil 5.85. 13 GHz Phot ölçüm değeri 64
Şekil 5.86. 14 GHz Pcold ölçüm değeri 64
Şekil 5.87. 14 GHz Phot ölçüm değeri 65

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.88. Anahtarlama matrisi ile kurulacak test düzeneği 66
Şekil 5.89. Anahtarlama birimi ile kurulan test düzeneği 66
Şekil 5.90. 7 GHz kazanç ölçüm değeri 67
Şekil 5.91. 7 GHz Pcold ölçüm değeri 68
Şekil 5.92. 8 GHz kazanç ölçüm değeri 68
Şekil 5.93. 8 GHz Pcold ölçüm değeri 69
Şekil 5.94. 9 GHz kazanç ölçüm değeri 69
Şekil 5.95. 9 GHz Pcold ölçüm değeri 70
Şekil 5.96. 10 GHz kazanç ölçüm değeri 70
Şekil 5.97. 10 GHz Pcold ölçüm değeri 71
Şekil 5.98. 11 GHz kazanç ölçüm değeri 71
Şekil 5.99. 11 GHz Pcold ölçüm değeri 72
Şekil 5.100. 12 GHz kazanç ölçüm değeri 72
Şekil 5.101. 12 GHz Pcold ölçüm değeri 73
Şekil 5.102. 13 GHz kazanç ölçüm değeri 73
Şekil 5.103. 13 GHz Pcold ölçüm değeri 74
Şekil 5.104. 14 GHz kazanç ölçüm değeri 74
Şekil 5.105. 14 GHz Pcold ölçüm değeri 75
Şekil 5.106. Test sonuç grafiği 76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

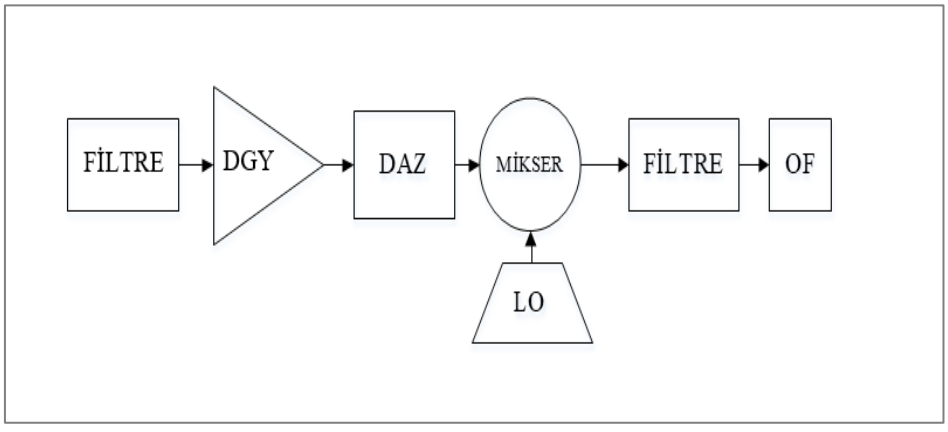
Simgeler	**Açıklamalar**
db	Desibel
dbm	Decibel- miliwatts
F	Gürültü faktörü
GHz	GigaHertz
hz	Hertz
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
MHz	MegaHertz

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AGO	Aşırı Gürültü Oranı
B	Bant genişliği
DVDS	Düşük Voltajlı Diferansiyel Sinyalleşme
DGY	Düşük Gürültülü Yükselteç
DAZ	Dijital Ayarlanabilir Zayıflatıcı
GF	Gürültü Figürü
LO	Lokal Osilatör
OTS	Otomatik Test Sistemi
OF	Orta Frekans
P1dB	1 dB Bastırım Noktası
PXI	Pci eXtensions for Instrumentation
RATVM	Radyo Tespiti ve Menzili
RF	Radyo Frekansı
TAC	Test Altındaki Cihaz
TTM	Transistör-Transistör Mantığı

1. GİRİŞ

Günümüzde radyo frekansı (RF) ve mikrodalga devrelerinin tasarımları oldukça önemlidir. Radyo Tespiti ve Menzili (RATVM) ve RF sistemlerinde farklı gereksinimlerin ve ihtiyaçların ortaya çıkması araştırma ve geliştirme çalışmalarının artmasına, farklı türden tasarımların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. RF kartlarının tasarımlarının farklılığı ve karmaşıklığı kartların testlerini de etkilemektedir. Gürültü figürü, kazanç, anlık dinamik alan, toplam dinamik alan, duyarlılık, P1dB satürasyon noktası, harmonik, faz gürültüsü RF birimlerine uygulanan başlıca testlerdir.

Test tasarım mühendisleri tasarlayacakları test sistemleri için test ekipmanlarını seçerken hangi tip testleri yapacaklarını dikkate alarak uygun test cihazlarını seçmelidirler. Tasarlanan test sistemi öncelikli olarak doğru ölçüm yöntemine sahip olması gerekir. Bunun paralelinde maaliyeti azaltmak ve test sürelerini kısaltmak da test sistemlerinin kalitesini arttırır. Örneğin Şekil 1.1'de verilen süperheterodin alıcı sistemin test edilmesi istenirse; giriş kanal sayısı, çıkış kanal sayısı, lokal osilatör (LO) frekans aralığı, giriş frekans aralığı, çıkış frekans aralığı gibi özellikler test tasarımını etkileyecektir. Alıcıda bulunan filtre, düşük gürültülü yükselteç (DGY), sayısal (dijital) ayarlanabilir zayıflatıcı (DAZ), mikser ve LO gibi elementler de test sistemini etkileyen unsurlardır.



Şekil 1.1. Filtre, düşük gürültülü yükselteç, dijital ayarlanabilir zayıflatıcı, mikser ve lokal osilatöre sahip bir süperheterodin almaç örneği

Test tasarım mühendisleri bu tarz alıcıları otomatik test sistemlerinde test etmek isterler. Çünkü yukarıda da belirtildiği gibi almaç sayısı, frekans genişliği, almaç üzerinde bulunan

kanalların fazla sayıda olması test sürelerini uzatan etmenlerdir. Otomatik test sistemleri (OTS) ile işçilik ve zaman kaybı engellenir.

Test sistemlerinde gürültü figürü ölçüm metodu olarak Y-faktör ve kazanç metotları kullanılır. Bu iki metot karşılaştırıldığında birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Kazanç metodunun kullanıldığı test sistemlerinde ölçüm alınacak cihazın yüksek kazanç veya yüksek gürültü figürüne sahip olması gerekmektedir. Aksi taktirde ölçüm doğruluğu azalmaktadır. Diğer yandan Y faktör metodunda gürültü figürü sonucu, iki farklı ölçümün çıkarılmasına dayalı olduğu için ölçüm doğruluğu artmaktadır, fakat ölçüm metodunun kullanıldığı test sistemlerinde gürültü üretecinin kullanılması gerekmektedir.

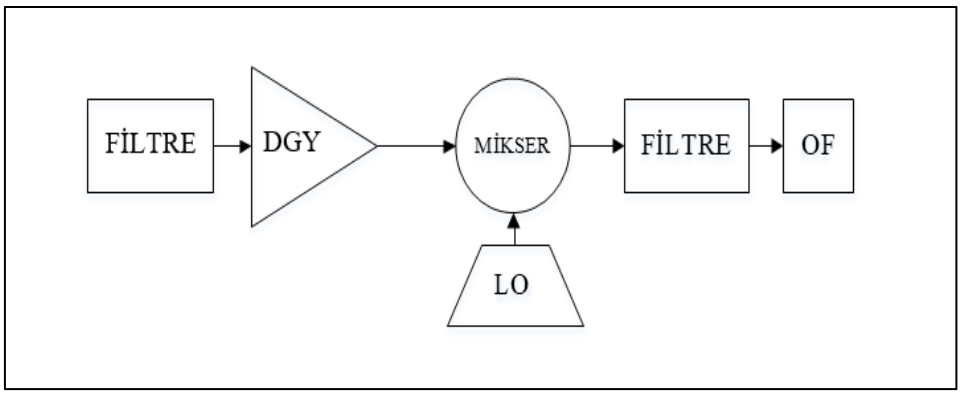
2010 yılında Joe Kelly ve Frank Goh yaptıkları araştırmada Y-faktör ve kazanç metodu üzerinde durmuştur. İki metodun da efektif kullanılabildiği alanlar verilmiş, avantajları ve dezavantajları detaylı şekilde incelenmiştir. Farklı gürültü figürü ve kazanç değerlerinde Y faktör metodunun daha kullanışlı olduğu belirtilmiş, fakat piyasada bulunan gürültü üreteçlerin kabiliyetlerinin sınırlı olmasından kaynaklı Y-faktör metodunda dezavantaj olduğu çıkarılmıştır [1].

2020 yılında Cristian Jimenez iki ölçüm metodunu karşılaştırmış aktif ve pasif elementler için ölçümler almıştır. Günümüzde Y-faktör metodunun kolay uygulanabilir olması ve endüstriyel cihazlarda uyumsuzluk hatalarının az olmasından kaynaklı Y-faktör metodunun kullanıldığı vurgulanmıştır [2].

Bu tez çalışmasında alıcı testlerinde sıkça kullanılan gürültü figürü ölçümleri üzerine durulmuştur. Gürültü figürü ölçüm metotları ile ilgili bilgiler verilmiş ve otomatik test sistemlerinde kullanılmak üzere özgün, alternatif bir test metodu sunulmuştur. Alternatif test metodu sayesinde fazladan alınacak kalibrasyon verilerine ihtiyaç duyulmadan tek seferde bir normalizasyon verisi alınarak testler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada Şekil 1.2'de blok diyagramı verilen 7 – 14 GHz frekans aralığında RF almaç tasarımı yapılmış ve bu alıcının RF bant boyunca gürültü figürü ölçülmüştür. Alıcı içerisinde bulunan kabloların, düşük gürültülü yükseltecin, filtrenin ve mikserin kayıpları ve kazançları network analizör yardımıyla ölçülmüş ve alıcının farklı frekanslarda kazanç değerleri hesaplanmıştır.

Aynı zamanda Labwindows/CVI yazılımı kullanılarak çok katlı sistemlerde gürültü figürü değeri hesaplama arayüzü tasarlanmıştır [3-4]. Analizör yardımıyla kayıpları ve kazançları ölçülen birimlerin değerleri hesaplama arayüzüne girilerek sistemin ölçülmesi gereken gürültü figürü değerleri hesaplanmıştır. Otomatik test sistemi üzerinde koşacak test yazılımı yine Labwindows/CVI yazılımı ile yazılmıştır.



Şekil 1.2. Ölçüm alınan cihazın blok diyagramı

Alıcı yapısı içerisinde yer alan DGY düşük gürültü figürüne sahip bir yükselteçtir. Bu sayede sistemin kazancı yükseltilirken, aynı zamanda sistemin gürültü figürü düşük tutulur. Mikser ve LO ise giriş frekansını istenilen frekansa indirmek/yükseltmek için kullanılır. Sonrasında filtre yardımıyla istenmeyen sinyallerin bastırılması sağlanır. Bu çalışmada ölçüm alınan almaç yapısı 7-14 GHz giriş frekans aralığında, 960 MHz merkezli ve 400 MHz bant genişliğine sahip çıkış frekansında çalışmaktadır.

Tezin 2. Bölüm'ünde gürültü ve gürültü figürünün tanımları ve gürültü çeşitleri verilmiştir. Gürültü figürünü etkileyen faktörler ve gürültü figürünün etkilediği dinamik alan ve duyarlılık terimleri incelenmiştir. Tanımları verilen terimlerin matematiksel formülleri verilmiş birbirleri arasındaki matematiksel ilişki gösterilmiştir.

Bölüm 3'te otomatik test sistemleri tanıtılmıştır. Otomatik test sistemlerinde yer alan donanım araçları verilmiş ve hangi amaçlarla kullanıldığı açıklanmıştır.

Bölüm 4.'te test sistemlerinde kullanılan gürültü figürü ölçümü hakkında bilgiler verilmiştir. Aynı zamanda gürültü figürü ölçüm metotlarını teorik olarak açıklanmış ve matematiksel formülleri gösterilmiştir.

Bölüm 5.'te teorik olarak açıklanan yöntemler deneysel olarak uygulanmış ve test sonuçları her bir yöntem için paylaşılmıştır. 7 – 14 GHz arası 1 GHz aralıklarla ölçümler alınmış ve sonuçlar detaylı tablolar halinde tutularak, sonuç bölümünde karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında önerilen alternatif test metodunun otomatik test sistemlerinde uygulanabilirliği test edilmiştir. Bu test metodu ile çok kanallı alıcıların veya alıcıların üretim testlerinin gerçekleştirilmesi kolaylaştırılmıştır. İşçilik ve zaman giderleri minimuma indirilmiştir.

2. GÜRÜLTÜ VE GÜRÜLTÜ FİGÜRÜ

2.1. Gürültü

Gürültü, istenmeyen sinyal olarak tanımlanır ve düzensizdir. RF ve mikrodalga sistemlerinde sinyali algılamada en önemli kriterlerden biri gürültüdür [5-6]. Gürültünün belirli bir değerden fazla olması sinyali algılamada problem yaratır. Gürültü sistemin dışından antenler ile alınabildiği gibi sistem içerisinde yer alan kaynaklar tarafından da üretilebilir. Bu sebeple gürültü yok edilemeyeceği için asıl amaç gürültünün etkisini azaltmaktır [7].

2.1.1. Termal (ısıl) gürültü

Johnson veya Nyquist gürültüsü olarak da bilinir. İletken içerisindeki elektronların termal etki ile dalgalanmalarından kaynaklanır ve en temel gürültü çeşidi olarak bilinir [8] ve Eş. 2.1 eşitliği ile verilir [7].

$$V = \sqrt{4RkTB} \tag{2.1}$$

Eşitlikte; R ohm cinsinden direnci, k_b Boltzmann sabitini ($1.38x10^{-23}$ J/K), T kelvin cinsinden sıcaklığı ve B ise bant genişliğini ifade etmektedir.

2.1.2. Atım gürültüsü

Elektronların rasgele dalgalanmalarından kaynaklanır [8].

2.1.3. Faz gürültüsü

İdeal osilatörler sade sinüs sinyale sahiptir, fakat gerçekte durum böyle değildir. Osilatörler faz modülasyon gürültülü komponentlere sahiptir [9]. Osilatörler düşük frekansta kırpışma gürültüsüne ve beyaz gürültüye sahiptir [10].

2.1.4. Beyaz gürültü

İsmini tüm renkleri içeren beyaz ışıktan almıştır. Beyaz gürültü de farklı frekanslarda eşit yoğunluğa ve sonsuz peryoda sahiptir [11].

2.2. Gürültü Figürü

Sistemin girişinde yer alan sinyal gürültü oranının, sistemin çıkışından alınan sinyal gürültü oranının oranına, gürültü faktörü (F), bu değerin logaritmik değerine ise gürültü figürü (GF) adı verilir [12-17]. Şekil 2.1'de bir sistemin sinyal gürültü oranı için blok diyagram verilmiştir. Teorik olarak hem sinyal hem de gürültü aynı oranda azalır veya artar, fakat devre gürültülü olduğu takdirde sistemin çıkış gürültüsü daha fazla artar. Bu artış sistemin sinyal gürültü oranın azalmasına sebep olur [18]. Gürültü faktörü, Eş. 2.2 ve gürültü figürü, Eş 2.3 eşitlikler ile verilir [7].



Şekil 2.1. Sistemin sinyal- gürültü oranı

$$F = (Si/Ni)/(So/No) \tag{2.2}$$

$$GF = 10\ \log\left[(Si/Ni)/(So/No)\right] \tag{2.3}$$

Eşitliklerde;

Si = sinyalin giriş gücünü,
So = sinyalin çıkış gücünü,
No = Gürültünü çıkış gücünü,
Ni = Gürültünün giriş gücünü ifade etmektedir.
To =290 Kelvin sıcaklığında gürültü değeri;

$$Ni = kToB \tag{2.4}$$

Eşitliği ile verilir. Bu durumda gürültü figürü,

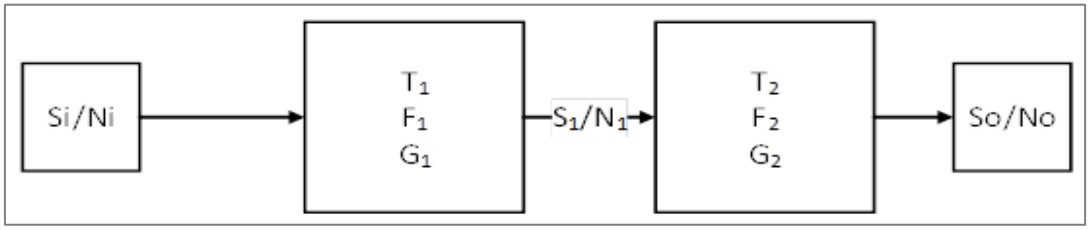
$$GF = No/G.Ni \tag{2.5}$$

$$GF = (GkToB + Nadd)/GkToB \tag{2.6}$$

olarak elde edilir.

2.2.1. Çok katlı (kaskatlı) sistemlerde gürültü figürü

Çok katlı sistemlerde gürültü figürünü ölçmek için her bir kattaki gürültü katsayısını (gürültü figürünü – Fn, burada; n = 1, 2, 3, …) bilmek gerekir [7, 19-20]. Genel olarak, ilk kattaki gürültü katsayısı çok kritiktir, çünkü sistemin gürültü katsayısına doğrudan etki eder. Şekil 2.2'de çok katlı sistemler için örnek olarak iki katlı bir sistem verilmiştir [7].



Şekil 2.2. İki katlı sistem örneği

Eş. 2.7' de sistemin gürültü katsayısı verilmiştir.

$$F = F1 + (F2 - 1)/G1 \tag{2.7}$$

Eş. 2.8'de çok katlı sistemlerde gürültü figürünün genel formülü verilmiştir.

$$F = F1 + (F2 - 1)/G1 + (F3 - 1)/(G1.G2) \tag{2.8}$$

Burada Gn her bir katın kazancıdır (n = 1, 2, 3, …). Gürültü figürü radyo frekansı veya mikrodalga sistemlerini tasarlarken dikkate alınan önemli bir parametredir. Genel olarak gürültü figürünü düşük tutmak amacıyla antenlerin yakınlarda düşük gürültü figürlü yükselteçler kullanılır. Eş. 2.7'den de görüldüğü üzere sistemde bulunan ilk katın gürültü figürleri çok kritiktir. Eğer ilk elemanlar olarak kazançsız birimler kullanılırsa (sınırlayıcı,

filtre, uzun kablolar vb.) sistemin gürültü figürü, bu birimlerin kayıpları ile doğru orantılı olacak şekilde artar.

2.3. Duyarlılık ve Dinamik Alan

RF tasarımcı sisteminde tasarım veya iyileştirme yaparken tek bir parametreyi düşünmez. Bir parametreyi iyileştirdiğinde farklı bir parametreyi bozma ihtimali vardır. Dinamik alan ise bu dengeyi sağlamayı yarayan bir RF parametresidir.

2.3.1. Duyarlılık

Duyarlılık, bir sistemin algılayabileceği en küçük sinyal olarak adlandırılabilir. Eş. 2.9'de verilen denklem ile duyarlılığın değeri hesaplanabilir [21-22]. Denkleme göre gürültü figürü duyarlılık faktörünü direkt etkileyen önemli parametrelerden biridir [23].

$$\text{Duyarlılık (dBm)} = -174\ \left(\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}\right) + \text{GF} + 10\log(\text{Bant Genişliği}) + \text{SNRmin} \tag{2.9}$$

Burada; SNR_{min} sinyal gürültü oranının minimum değeridir.

2.3.2. Dinamik alan

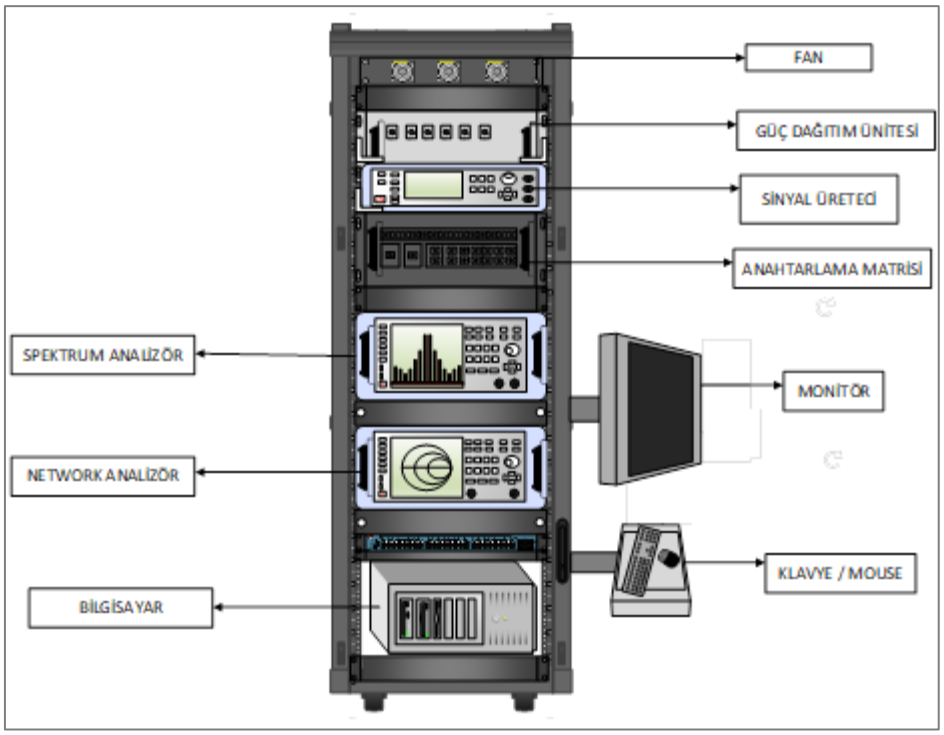
Dinamik alan, bir sistemin 1 dB satüre olduğu nokta (P1dB) ile algılayabileceği minimum sinyal arasındaki farktır [21, 24]. Gürültü figürü ayrıca dinamik alanı da etkileyen önemli bir parametredir.

$$\text{Dinamik Alan} = \text{P1dB} - \text{Pduyarlılık} \tag{2.10}$$

3. OTOMATİK TEST SİSTEMLERİ

Tasarlanan RF sistemler (özellikle süperheterodin alıcı gibi karmaşık sistemler) belirli testlere tâbi tutulurlar. Bu testler çoğunlukla tasarımın başında belirlenen isterlere göre şekillenir. Şekil 1.1'de verilen örnekte olduğu gibi süperheterodin alıcı sistemler filtre, düşük gürültülü yükselteç, mikser, lokal osilatör, ayarlanabilir zayıflatıcı gibi birimler içerir [25]. Tüm birimlerin seçilimi veya tasarımı, tasarım öncesi belirlenen isterlere göre yapılır. Örneğin, eğer sistemin düşük gürültü figürlü ve yüksek kazançlı olması istenirse, Eş. 2.8'de verilen çok katlı sistemlerde gürültü figürü formülüne göre düşük gürültü figürlü yükselteç anten birimlerinin yakınlarına konumlandırılmalıdır. Böylece duyarlılığın ve dinamik alanın artması sağlanır.

Tasarımı yapılan birimlerin test süreçleri de tasarım süreci kadar önemlidir. Birime uygulanan testlerin süresi, tasarım süresinden uzun olmamalıdır. Özellikle çok kanallı ve geniş frekanslı sistemlerin testleri uzun sürebilir. Test sürelerini, ölçüm doğruluğunu bozmadan kısaltabilmek için otomatik test sistemleri kullanılır. Şekil 3.1'de otomatik test düzeneği örneği görülmektedir. Otomatik test sistemleri yapılacak testlere göre farklı donanım ve yazılım konfigürasyonlara sahiptir.



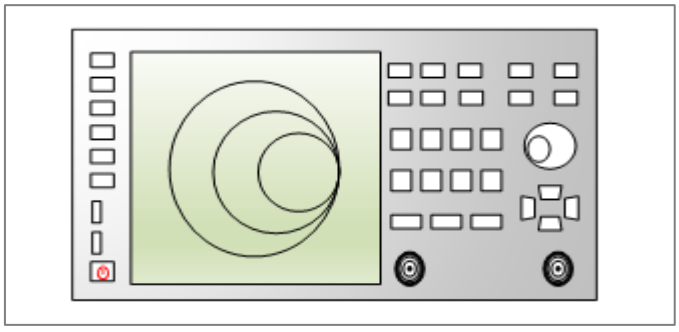
Şekil 3.1. Otomatik test düzeneği örneği

3.1. Donanım Araçları

Otomatik test sistemleri test edilecek birimlere göre farklı donanım konfigürasyonlarına sahip olabilir. Bir RF alıcı sistemini test etmek için network analizör, spektrum/sinyal analizör, sinyal üreteci, RF anahtarlama birimi, gürültü üreteci başlıca kullanılan cihazlardır [26]. Bunlara ek olarak test edilecek sistemde bulunan arayüzlerin farklılığına göre ethernet, RS-485/422/232, Düşük Voltajlı Diferansiyel Sinyalleşme (DVDS), Transistör – Transistör Mantığı (TTM) arayüz gereksinimleri karşılayacak Pci eXtensions for Instrumentation (PXI) kart ve şaseler eklenebilir. RF test cihazları seçerken tasarlanan birimin çalıştığı dinamik alan, çalışma frekansı veya test düzeneğinde kullanılacak kabloların kayıpları göz önüne alınmalıdır. Örnek olarak, 0 dBm gücünde bir test yapmak isteniyorsa test düzeneğinin de kaybı dikkate alınarak yaklaşık 0 + test düzeneği kayıpları gücü kadar güç verebilen bir sinyal üreteci seçilmelidir. Çünkü test düzeneğindeki güç kayıpları sinyal üretecine eklenir ve yüksek frekanslarda kablo ve anahtarlama matrisinin güç kayıpları oldukça fazla olur. Eğer yeterince yüksek güç üretilemezse P1dB testi yapılırken güç limitine takılabilir ve testin gerçekleşmesi mümkün olmayabilir. Aynı şekilde RF alıcının giriş ve çıkış frekansına uygun bir network ve sinyal/spektrum analizör seçilmelidir. Kısacası test edilecek birimlere uygun cihazlar seçilmeli ve test cihazlarından istenilen uygun özellikleri (opsiyonları) bulunmalıdır.

3.1.1. Network analizör

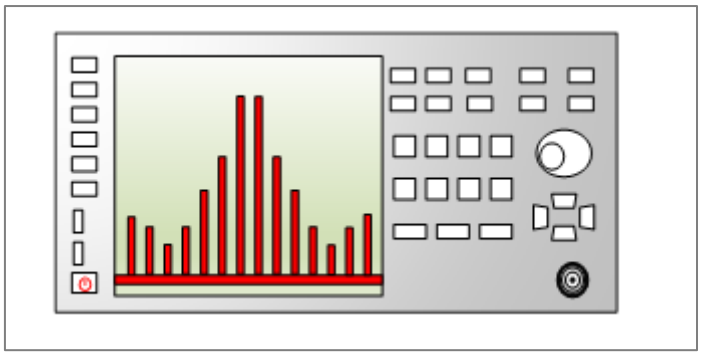
Network analizör genlik ve faz ölçmeye yarayan bir ölçüm cihazıdır. Genel olarak S-parametrelerini ölçmek için kullanılır. Şekil 3.2'de verilen iki kanallı network analizör örneğinde S11 ve S22 yansıma parametrelerini verirken, S21 ve S12 bir porttan diğer porta giden sinyalin iletimini (kaybını veya kazancını) ölçer [27].



Şekil 3.2. İki kanallı network analizör görseli

3.1.2. Spektrum / sinyal analizör

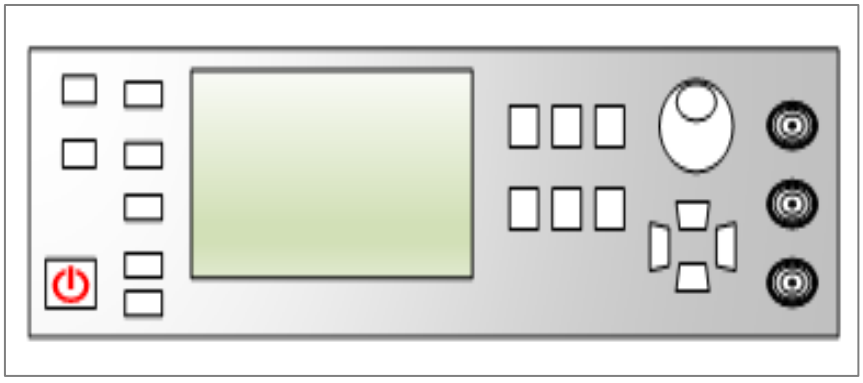
Temel olarak spektrum / sinyal analizör cihazlarında sinyalin genliği ve frekansı ölçülür. Ek olarak ölçülecek parametrelere göre cihaza farklı özellikler eklenebilir. Örnek olarak, gürültü figürü ve faz gürültüsü ölçümleri de spektrum/sinyal analizör kullanılarak yapılabilir. Spektrum analizör aynı zamanda süperhetorodin alıcı örneğidir. Verici bir sinyal çıkış olmadığı için test düzeneklerinde genelde sinyal üreteci birlikte kullanılır [28]. Şekil 3.3'te örnek bir spektrum analizör görseli verilmiştir.



Şekil 3.3. Spektrum analizör görseli

3.1.3. Sinyal üreteci

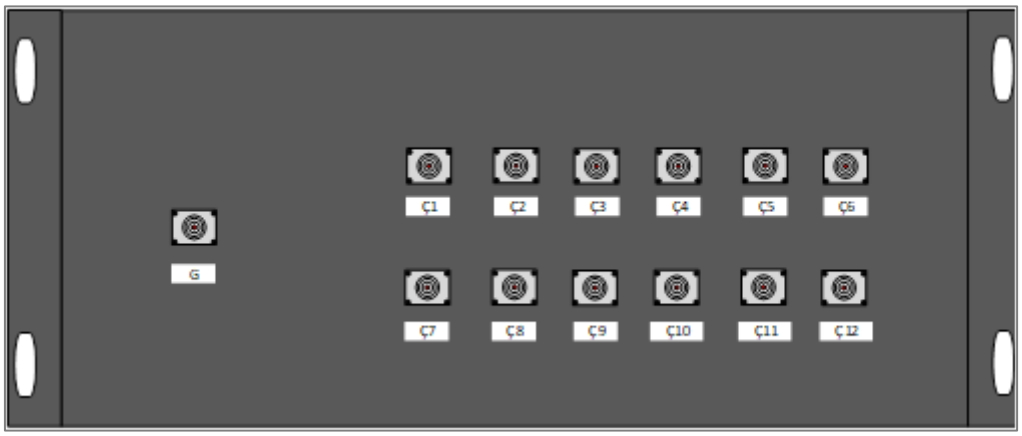
Sinyal üreteçleri belirli frekansta istenilen gücü vermeye yarayan test cihazıdır. Frekans, güç, darbe genişliği ve darbe tekrarlama frekansı gibi parametreler değiştirilerek sinyal elde edilir. Çok yüksek değerlere çıkılamadığı ve çok düşük güçlere inilemediği zamanlarda test düzeneğine ekstradan yükselteç ve zayıflatıcı eklenebilir. Şekil 3.4'te örnek bir sinyal üreteci görseli verilmiştir [29].



Şekil 3.4. Sinyal üreteci görseli

3.1.4. RF anahtarlama birimleri

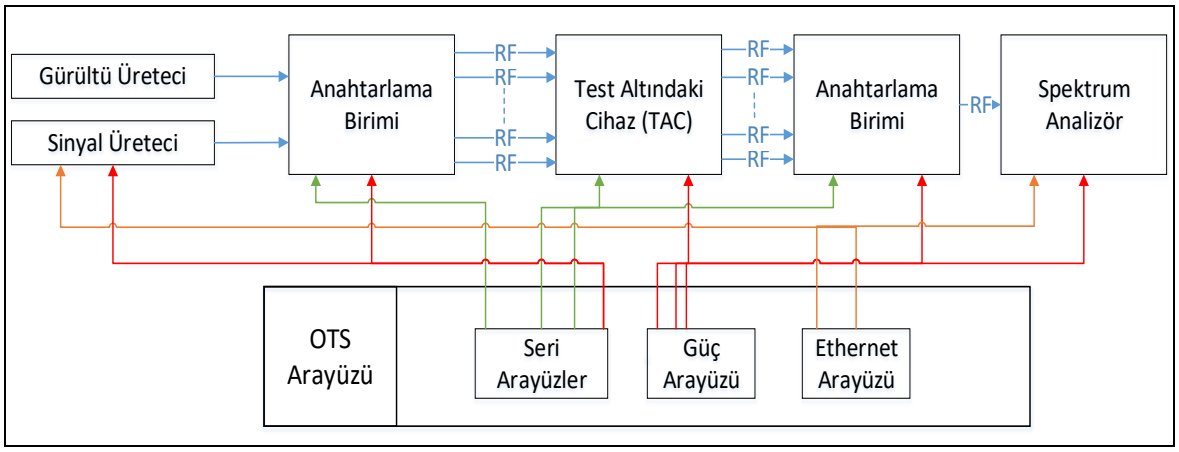
RF anahtarlama birimleri gücü iletim hatları ile üzerinden yönlendirmek için kullanılır [30-31]. Çok kanallı alıcı testlerinde yaygın olarak kullanılır. Şekil 3.5'te 12 kanallı RF anahtarlama birimi örneği verilmiştir.



Şekil 3.5. On iki kanallı RF anahtarlama birimi örneği

4. TEST SİSTEMLERİNDE GÜRÜLTÜ FİGÜRÜ ÖLÇÜMÜ

RF test sistemleri birçok gereksinimin test edilebilmesi için tasarlanır. Tasarlanan test sistemleri kısa sürede ve doğru bir şekilde testlerin gerçekleşmesi için kullanılır [32-34]. Özellikle süperhetorodin almaç testlerini gerçekleştirebilmek için bir almaç içerisinde bulunabilecek birimleri, kartları tanımak ve bilmek gerekir. Ayarlanabilir zayıflatıcı, lokal osilatör, yükselteç, filtre, anahtarlama birimi, güç sınırlayıcı, güç bölücü, kuplör bunlardan en yaygın kullanılanlardır. Her birimin farklı görevleri olsa da nihai tasarımda belirli görevleri yerine getirebilmek için tasarlanırlar. Otomatik test sistemleri ise bu birimlerin bireysel olarak testlerini yapmak ve aynı zamanda birimlerin entegrasyonu tamamlandığında performans testlerini gerçekleştirmek için tasarlanır. Gürültü figürü ise bu testlerin en önemlilerinden biridir. Gürültü figürü testinin, test edilecek birime ve birimin tasarımına göre test algoritması ve düzeneği değişebilir. Şekil 4.1'de tasarlanacak bir OTS'in blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.1. Otomatik test sistemi blok diyagramı

4.1. Gürültü Figürü Ölçüm Metotları

Gürültü figürü ölçümleri için yaygın olarak iki farklı ölçüm tekniği kullanılır. Bunlardan biri Y- faktör metodu, diğeri ise kazanç metodu olarak bilinir. Bu tekniklerin seçimi, test edilecek birime, kurulmak istenen test düzeneğine göre farklılıklar gösterir [35].

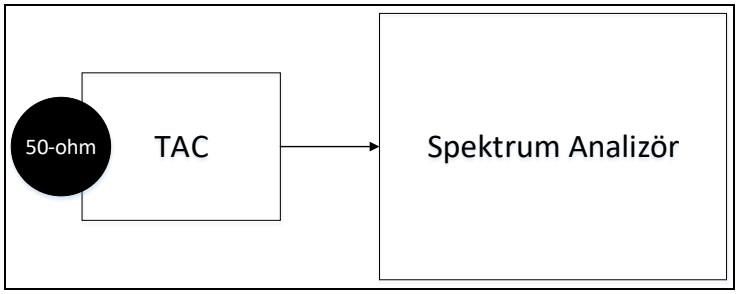
Çizelge 4.1. Gürültü figürü ölçüm teknikleri avantaj ve dezavantajları

	Avantajlar	Dezavantajlar
Kazanç Metodu	• Test düzeneği için kolay kurulum	• Düşük kazanç / gürültü figürlü testler için ölçüm doğruluğunun düşmesi, • Yüksek performanslı spektrum analizör, • Uyumsuzluk hatası.
Y Faktör Metodu	• İki ölçümün karşılaştırılmasına bakıldığı için geniş gürültü figürü ve kazanç için ölçüm doğruluğu, • Spektrum analizör opsiyonu yerine güç kaynağı kullanılırsa kolay kurulum.	• Çeşitli gürültü figürü ölçümleri için çeşitli gürültü üreteci (aşırı gürültü oranı- AGO), • Uyumsuzluk hatası.

4.1.1. Kazanç metodu

İsminden de anlaşılacağı üzere, test edilecek birimin kazançlı olması gerekir [1]. Gürültü üreteci gibi gürültü kaynaklarına ihtiyaç duyulmaz. Spektrum analizör ve RF test kablosu yeterlidir. Fakat spektrum analizörün, güç yoğunluğunu ölçmek için yüksek performanslı olması gerekir. Aynı zamanda Test Altındaki Cihaz (TAC) yapısının girişine 50 ohm bağlanması test doğruluğu açısından önemlidir. Şekil 4.2'de test düzeneği verilmiştir. Eş. 4.1'de gürültü figürü ölçümü için gerekli kazanç formülü verilmiştir.

$$\mathrm{GF} = \mathrm{Pcold\ (dBm/Hz)} - \left(-174\ (\mathrm{dBm\ /\ Hz})\right) - \mathrm{Kazanç} \tag{4.1}$$



Şekil 4.2. Kazanç metodu test düzeneği örneği

4.1.2. Y-Faktör metodu

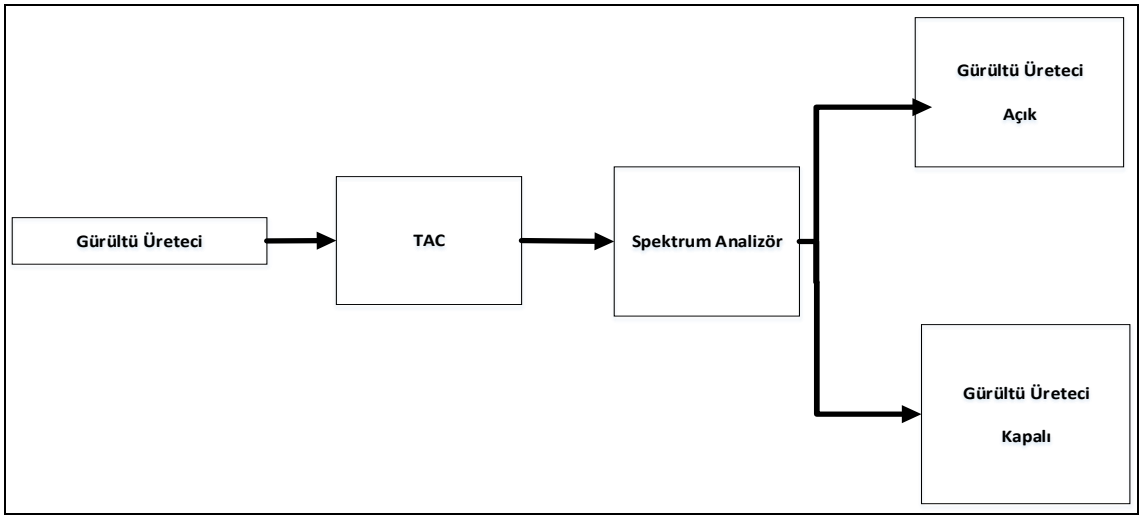
Y – Faktör metodu iki farklı ölçümünün oranına dayanır ve formülasyonları Eş. 4.2 ve Eş. 4.3 ile verilir [36].

$$\mathrm{GF} = 10 \log (\mathrm{AGO}/(\mathrm{Y}-1)) \tag{4.2}$$

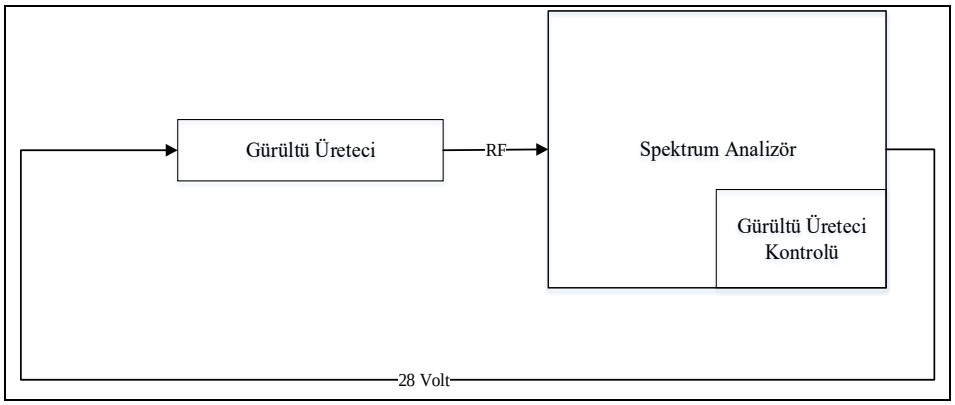
$$Y(dB) = Phot - Pcold \quad (4.3)$$

Burada, AGO aşırı gürültü oranıdır. Gürültü üretecinin çalıştığı modda ölçülen güç yoğunluğu değeri "Phot", kapalı durumda olduğu modda alınan güç yoğunluğu değeri ise "Pcold" olarak tanımlanır. İkisinin arasındaki değer ise Y – Faktörü'nü verir ve bu değer "1" değerinden oldukça fazla olacağı için hesaplamalarda ihmal edilebilir. Şekil 4.3'te Y- Faktör ölçüm düzeneği verilmiştir [36].

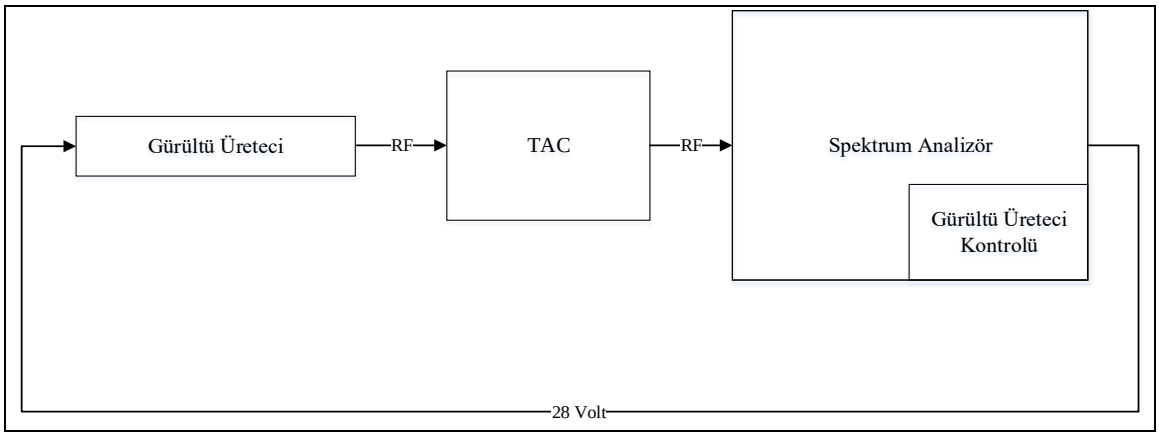
Y – faktör metodu piyasada bulunan birçok spektrum analizörün özelliklerinde yer almaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te ölçüm düzenekleri ile ilgili çizimler verilmiştir. Ölçüm almadan önce gürültü üreteci üzerinde yer alan AGO tablosu girilmeli ve RF kablo ile kalibre edilmelidir. Sonrasında test düzeneği kurulmalı ve ölçümler alınmalıdır [37].



Şekil 4.3. Y- Faktör ölçüm düzeneği



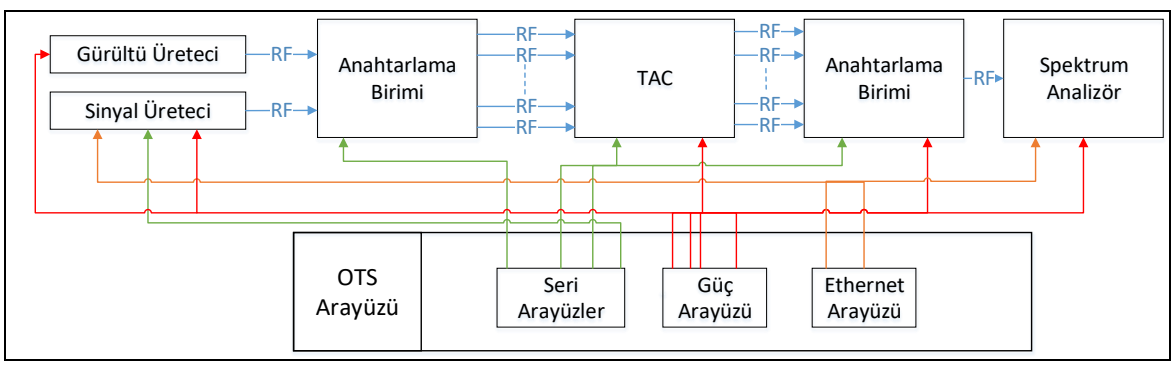
Şekil 4.4. Test düzeneği: kalibrasyon



Şekil 4.5. Test düzeneği: ölçüm

Ancak TAC'ın frekansı alt veya üst çevirici birimine sahip ise yukarıda verilen test düzenekleri genişler. TAC'ın giriş ve çıkış frekans çeşitliliğine göre kalibrasyon ölçümleri tekrarlanır. Örnek olarak TAC yapısı içerisinde frekans alt çevirici bir birim var ve çıkış frekansı sabit ise spektrum analizör girişine sabit frekansta bir sinyal gelir, aynı zamanda giriş frekansı ve TAC'ın LO frekansı değişiklik gösterir. Bu problemin çözümü için spektrum analizörün opsiyonlarını genişletmek veya işçiliği arttırmak gerekir.

Otomatik test sistemlerinde ölçüm doğruluğu, test süresi, ölçüm stabilizasyonu gibi parametreler önemlidir. Ölçülen birimin çoklu kanal yapılı olması, frekans aralığının uzun olması gibi durumlarda her bir parametrenin sağlanması zordur. Fakat bir o kadar da önemlidir. Gürültü figürü ölçümlerinde de test süresinin kısaltılması ve ölçüm doğruluğunun sağlanması için yapılan bu çalışmada ideal test düzeneği kurulmuştur. Bu tez kapsamında geliştirilen test düzeneği aynı zamanda diğer RF performans ve arayüz testleri için de uygulanabilirdir. Tüm RF testleri tek bir OTS ile test edilebilecek hale getirilmiştir. Şekil 4.6'da tez kapsamında önerilen test düzeneği verilmiştir.

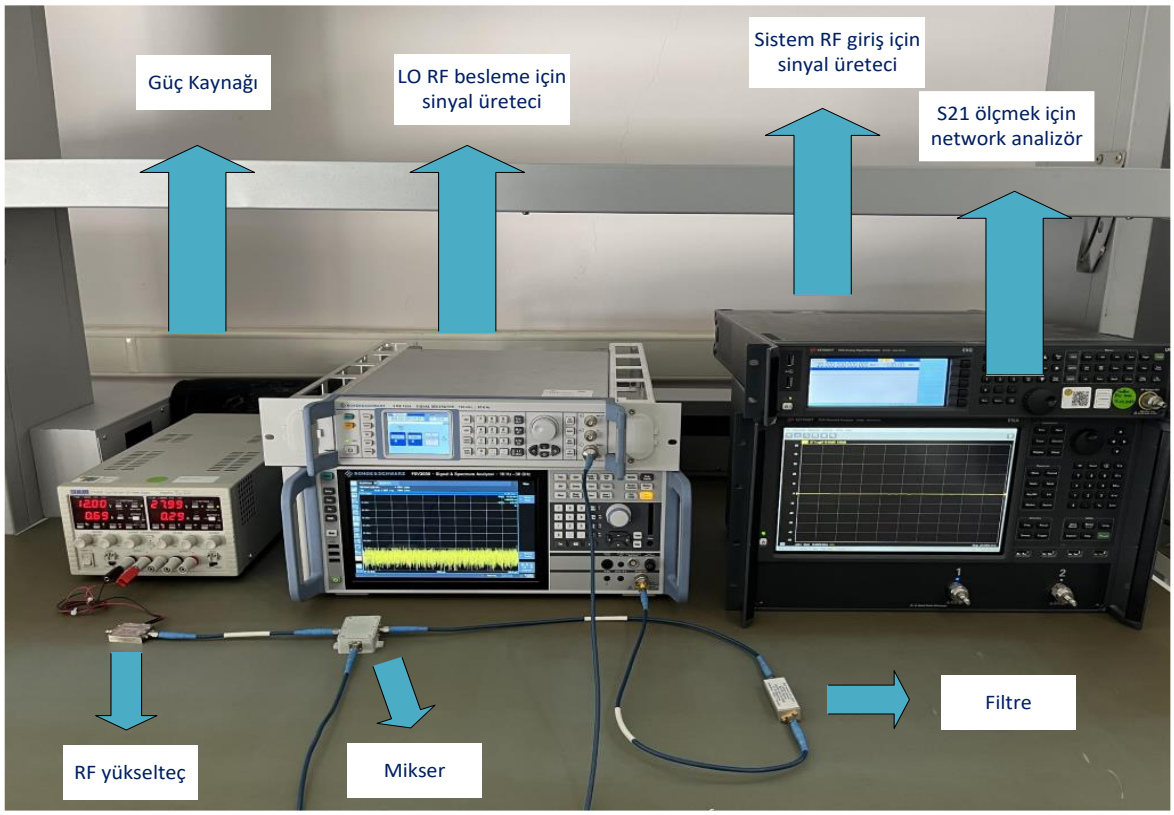


Şekil 4.6. Önerilen test düzeneği

5. SİMÜLASYON VE UYGULAMA

Önceki bölümde gürültü figürü ölçüm metotları ve örnek test düzenekleri verilmiştir. Bu bölümde ise bu metotların uygulama sonuçları paylaşılmıştır. Aynı zamanda Labwindows / CVI programı kullanılarak hazırlanan çok katlı sistemlerde gürültü figürü ölçüm analizi yazılımı ile sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Testler öncesi basit heterodin almaç örneği tasarlanmış ve Şekil 5.1'de verilmiştir. Almaç için düşük gürültü figürlü yükselteç, mikser, filtre, lokal osilatör (sinyal üreteci) kullanılmıştır. Kurulan almaç birimi 7 – 14 GHz frekans arası çalışmaktadır. Giriş frekansı mikser ve lokal osilatörle çarpılarak 960 MHz merkezli, 400 MHz bant genişliğinde ara frekansa (Intermadiate Frequency - IF) indirilmiştir.



Şekil 5.1. Ölçüm düzeneği ve test cihazları

Testler esnasında kullanılan gürültü üretecinin AGO tablosu Çizelge 4.1'de verilmiştir.

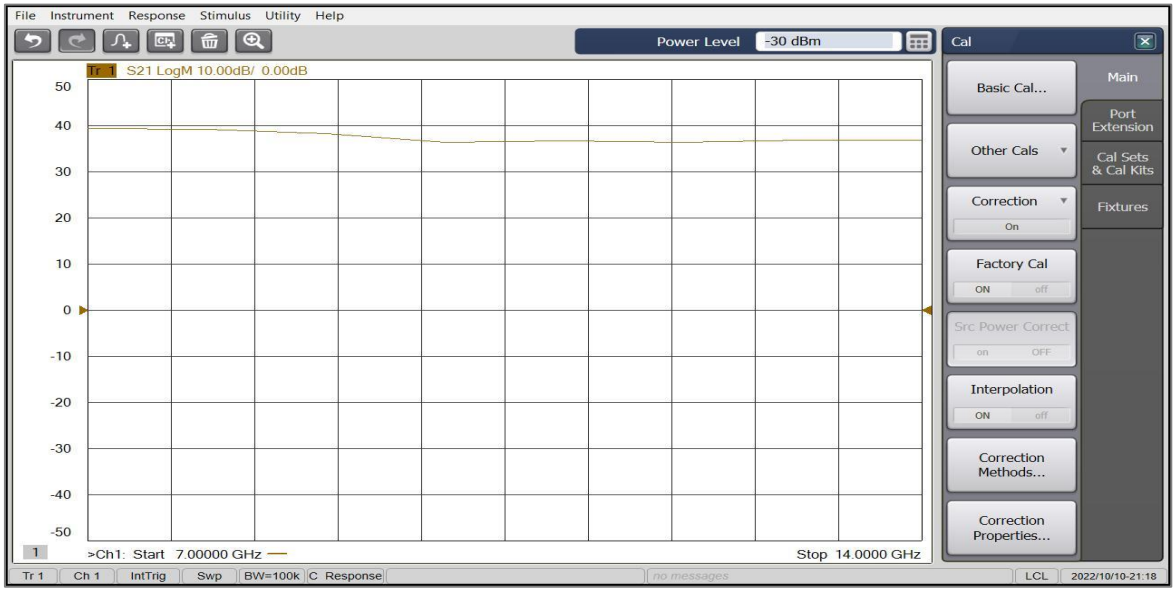
Çizelge 5.1. Gürültü üreteci AGO değerleri

Frekans (GHz)	AGO (dB)
7	14,35
8	14,3
9	14,26
10	14.32
11	14.35
12	14.38
13	14.37
14	14.48

5.1. Simülasyon

Birimlerin entegrasyonu yapılmadan önce tüm birimlerin S21 ölçümleri alınmıştır ve Şekil 5.2'den Şekil 5.14'e kadar verilmiştir.

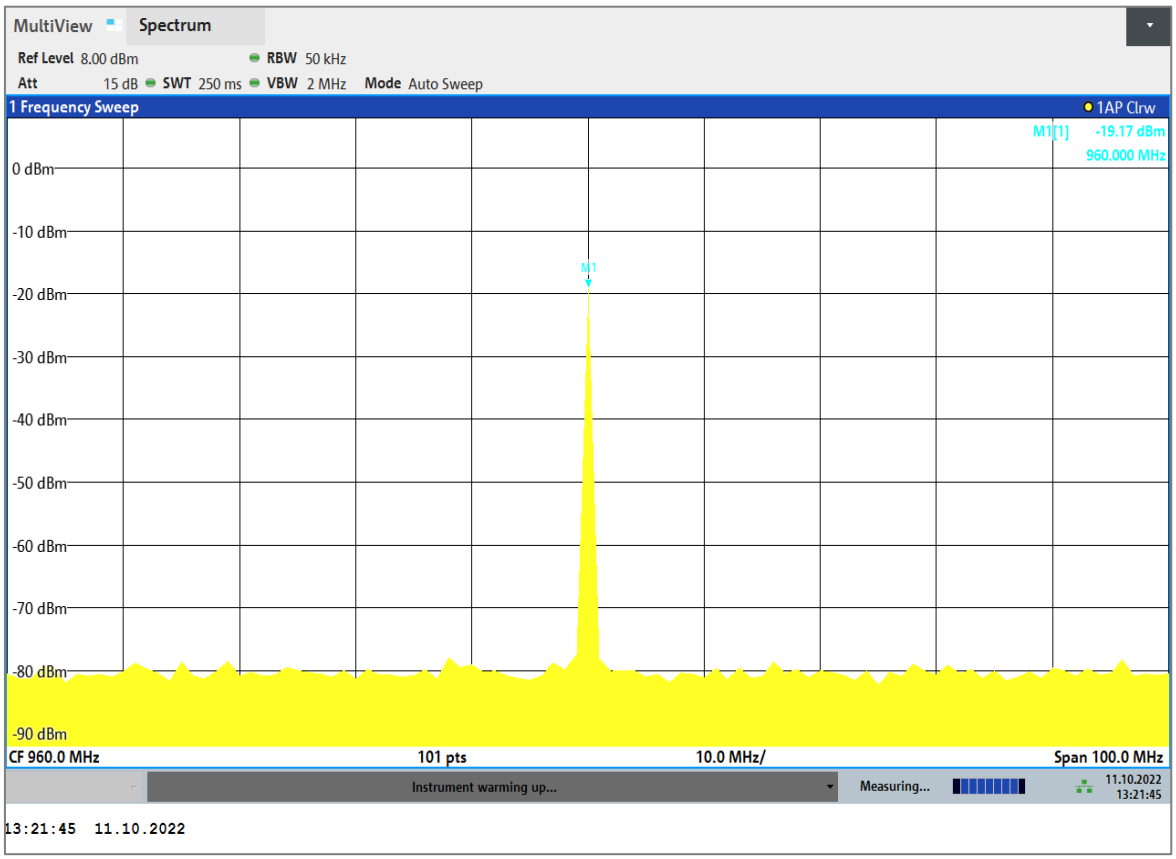
Sonrasında "Kaskat Yapılı Sistemlerde Gürültü Figürü.exe" yazılımı kullanılarak olması gereken gürültü figürü değeri hesaplanmıştır. Birimlerin entegrasyonu sağlanmadan önce birim bazlı kazanç ve gürültü figürü analizi yapılmıştır. Labwindows / CVI programında gürültü figürü analizi arayüzü yazılmış, gürültü figürü değerleri hesaplanmıştır. S21 ve kazanç ölçüm sonuçları Şekil 5.2- Şekil 5.14'te verilmiştir.



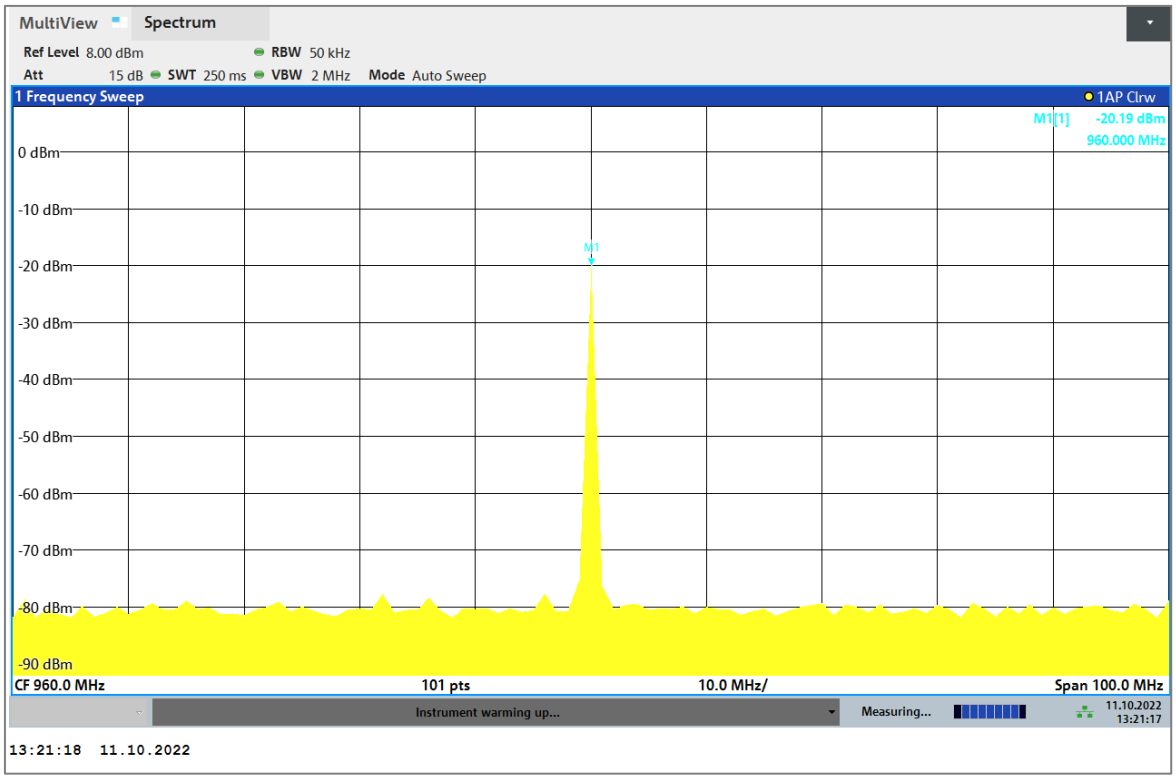
Şekil 5.2. RF yükselteç S21 kazanç ölçümü



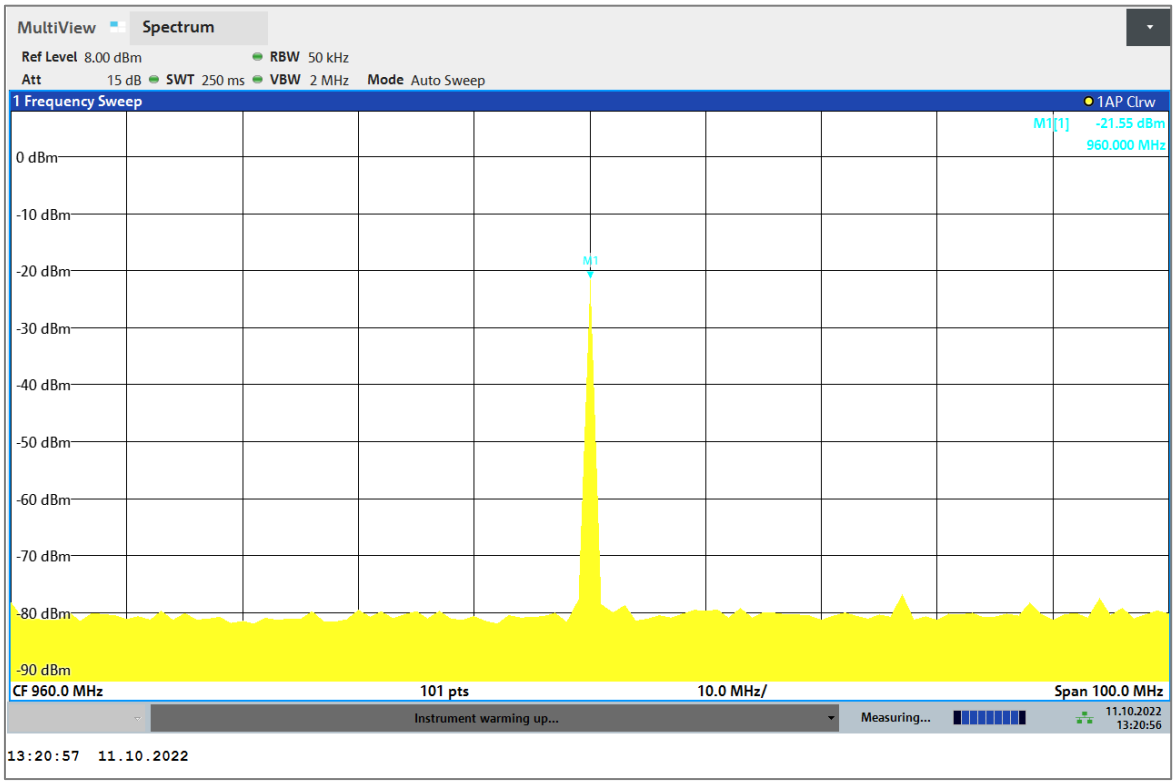
Şekil 5.3. Filtre biriminin S21 ölçümleri



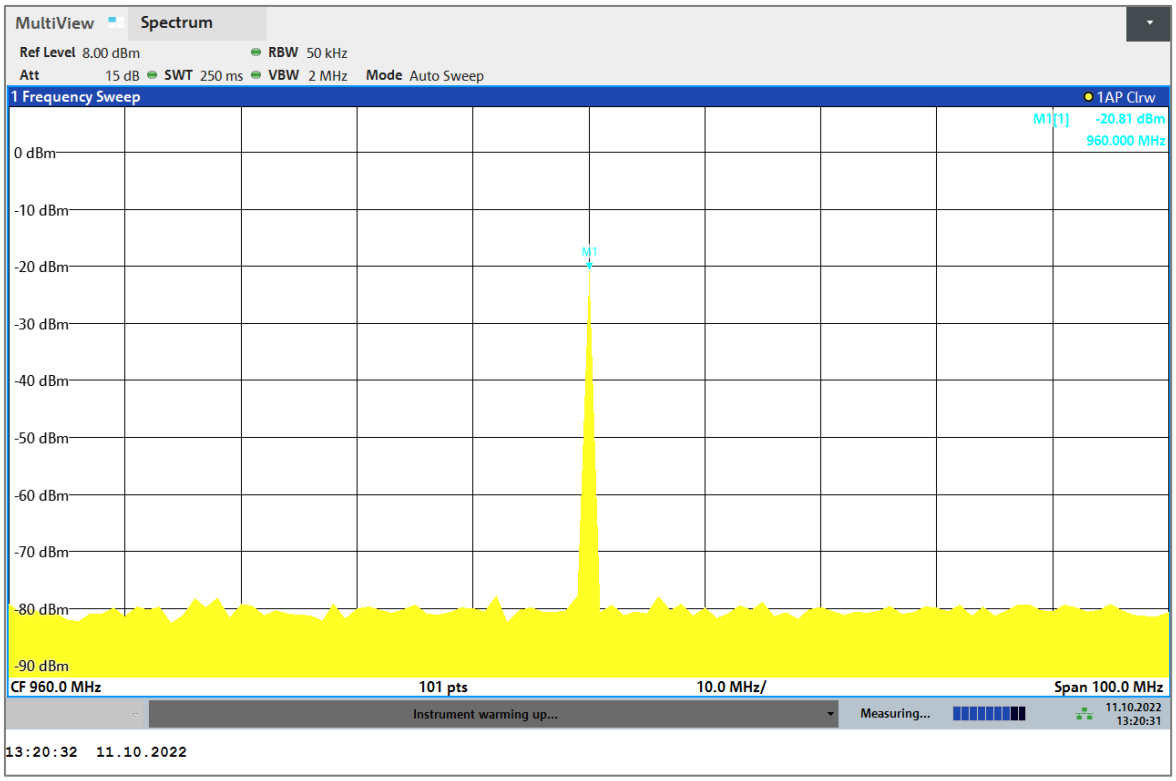
Şekil 5.4. 7 GHz mikser ölçümü -19.17 dBm (giriş gücü -10 dBm)



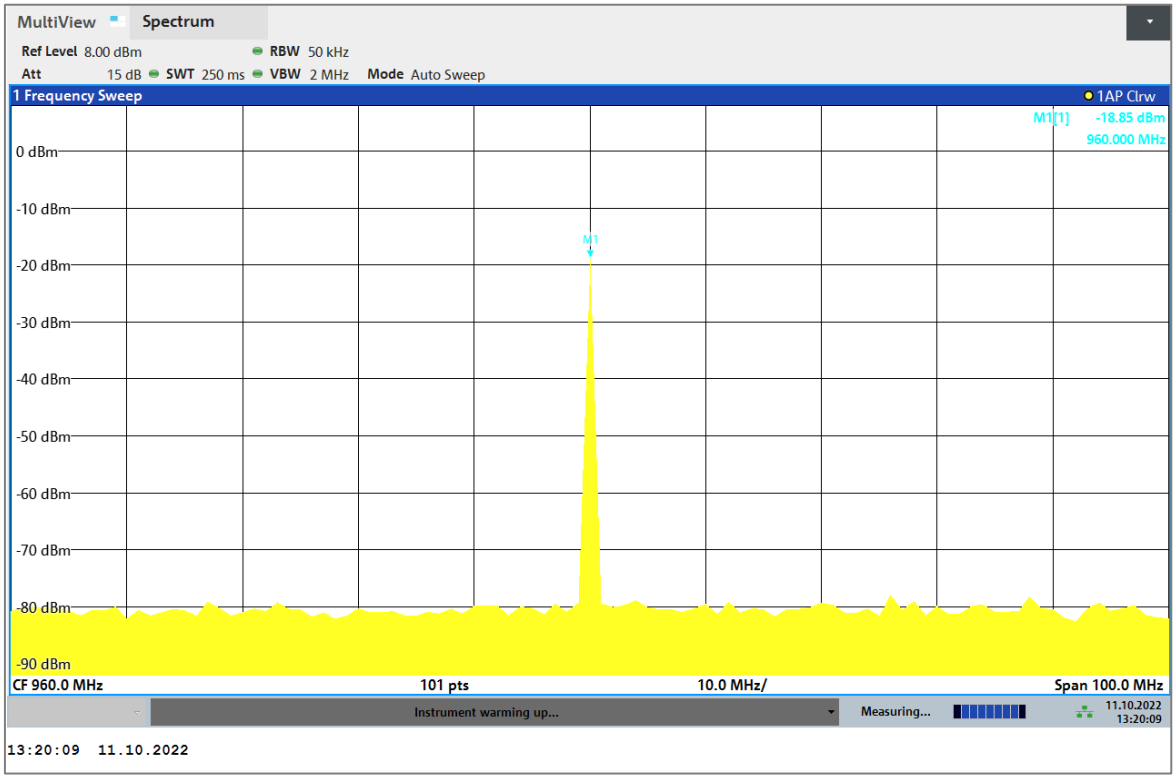
Şekil 5.5. 8 GHz mikser ölçümü -20.19 dBm (giriş gücü -10 dBm)



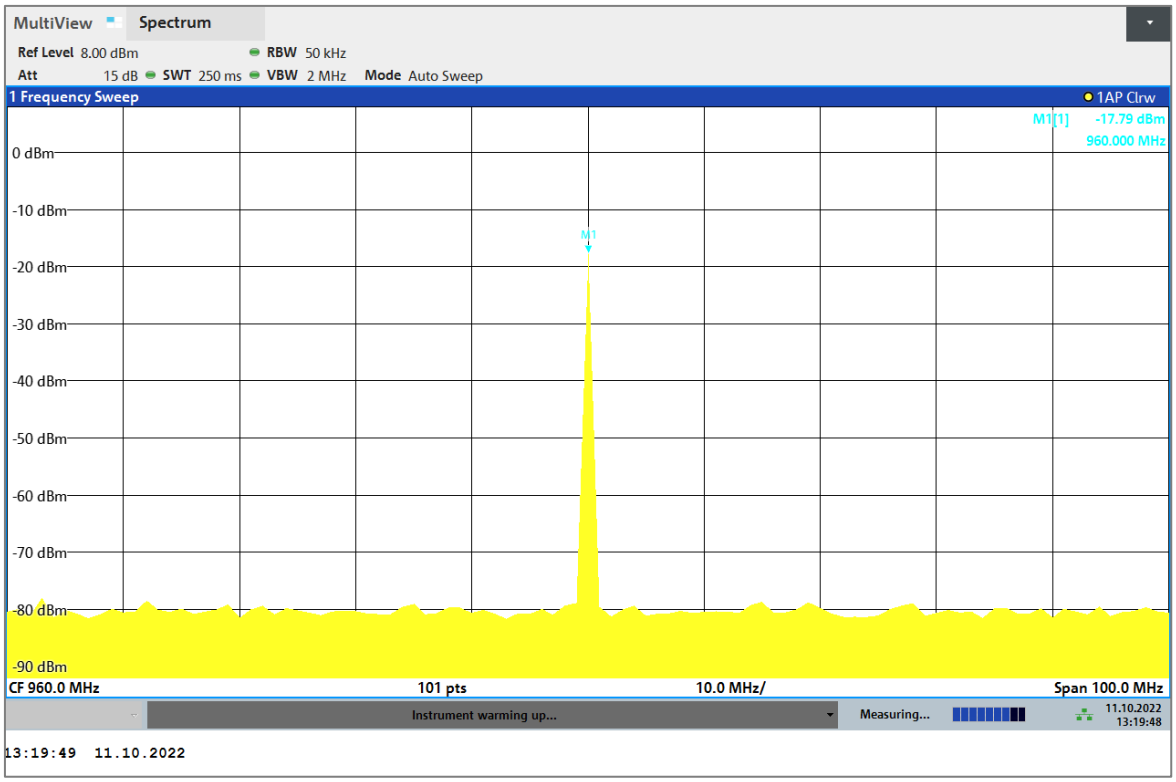
Şekil 5.6. 9 GHz mikser ölçümü -21.55 (giriş gücü -10 dBm)



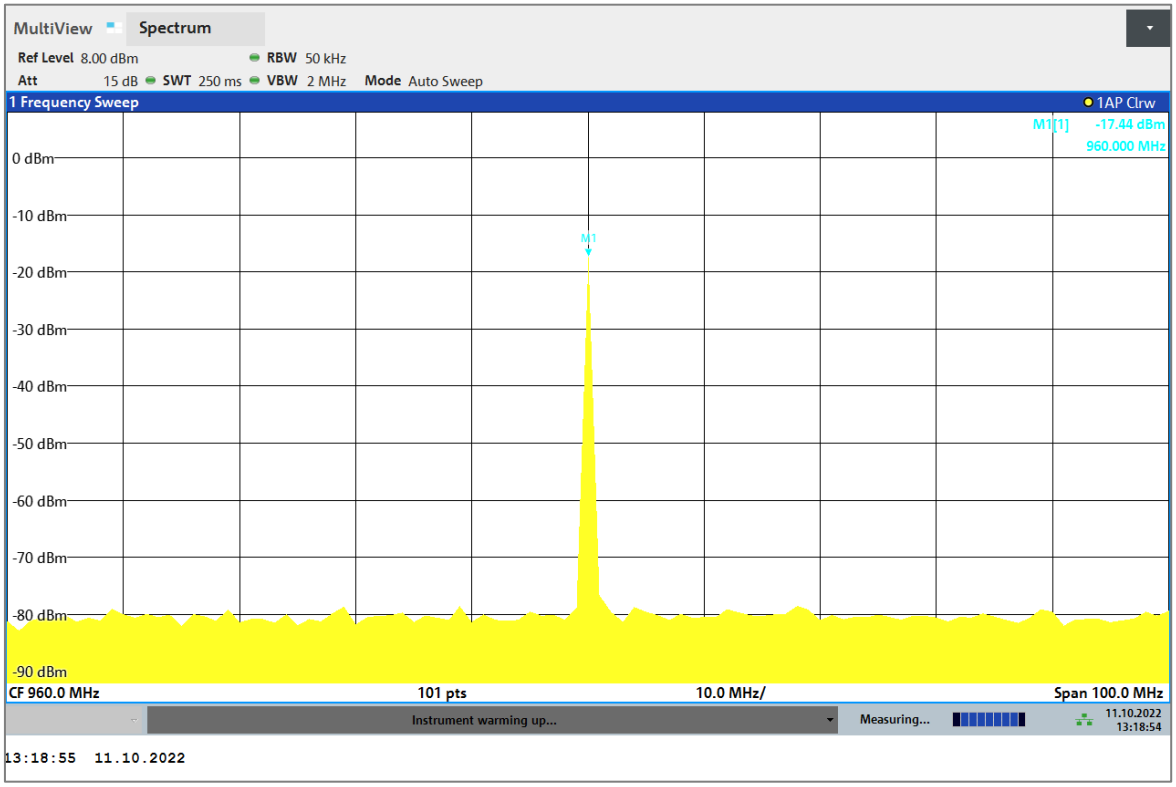
Şekil 5.7. 10 GHz mikser ölçümü -20.81 dBm (giriş gücü -10 dBm)



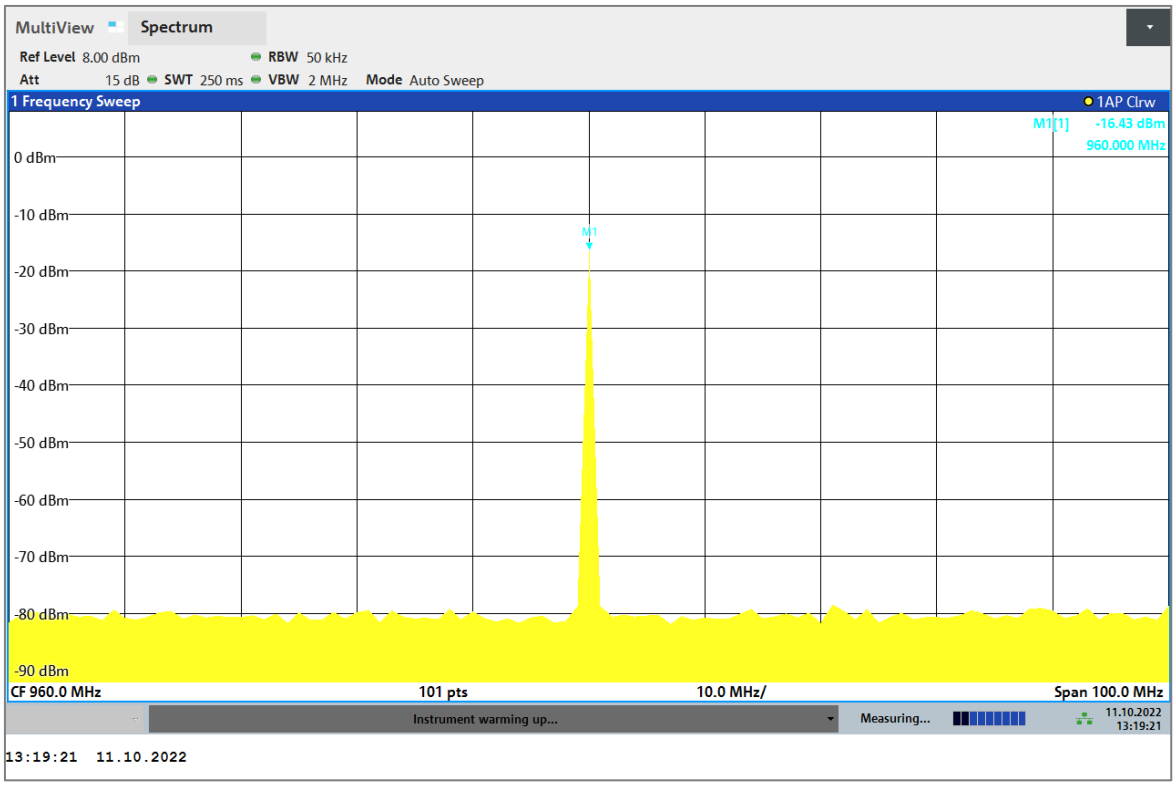
Şekil 5.8. 11 GHz mikser ölçümü -18.85 dBm (giriş gücü -10 dBm)



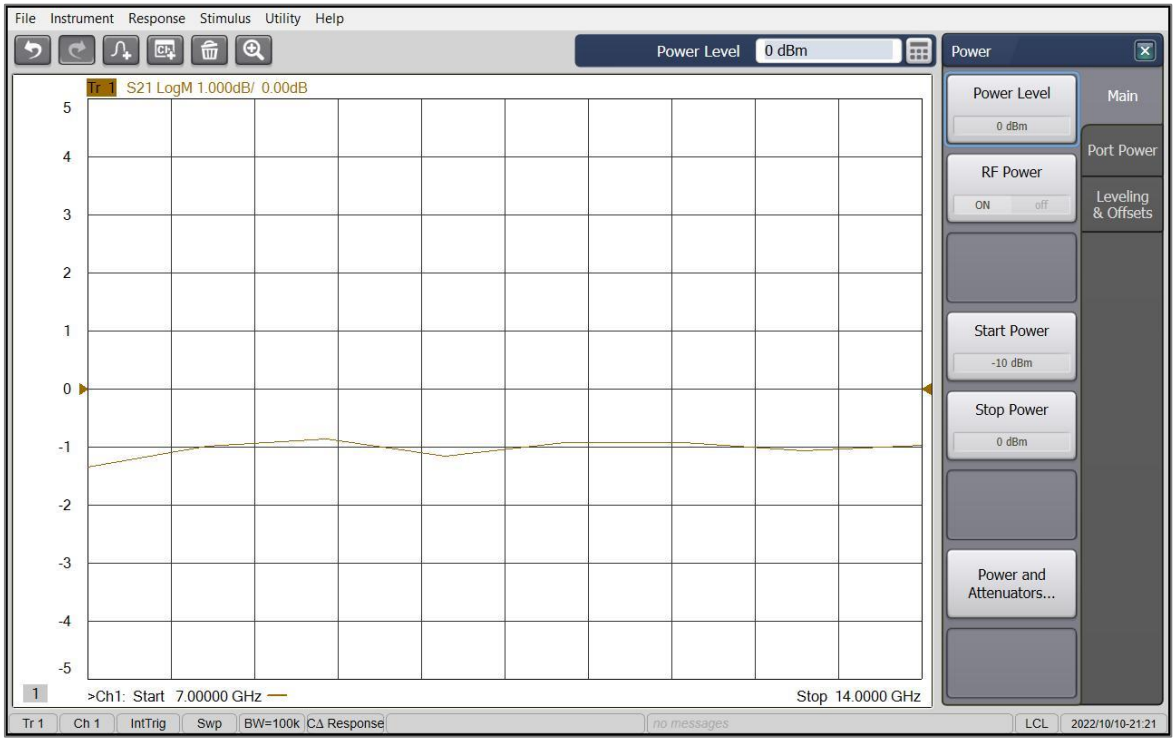
Şekil 5.9. 12 GHz mikser ölçümü -17.79 dBm (giriş gücü -10 dBm)



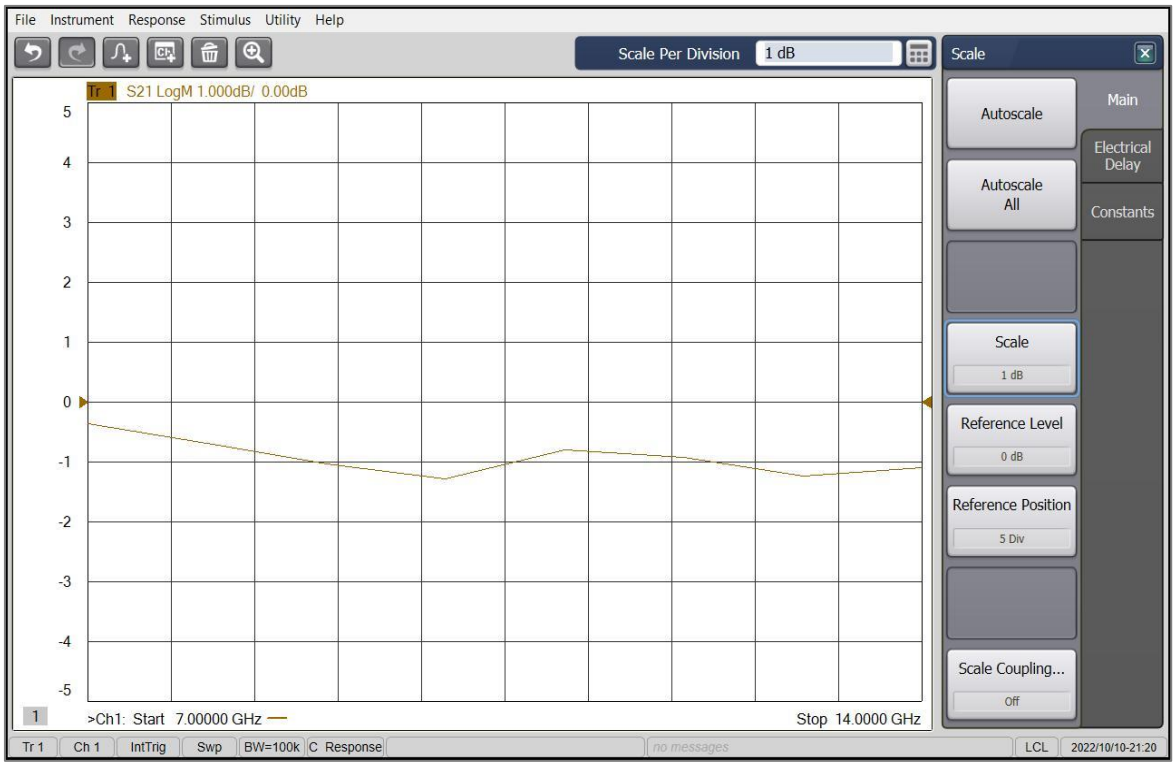
Şekil 5.10. 13 GHz mikser ölçümü -17.44 dBm (giriş gücü -10 dBm)



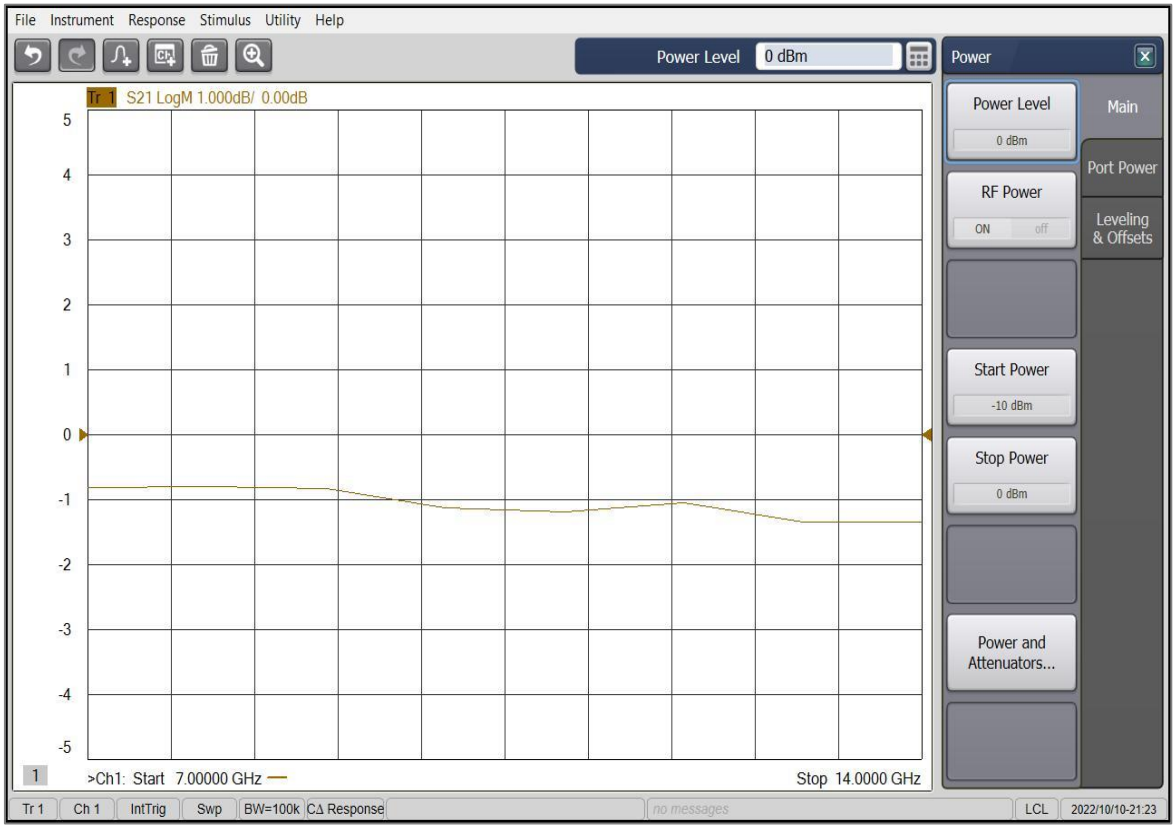
Şekil 5.11. 14 GHz mikser ölçümü -16.43 dBm (giriş gücü -10 dBm)



Şekil 5.12. RF yükselteç- Mikser arası RF kablo



Şekil 5.13. Mikser- Filtre arası RF kablo



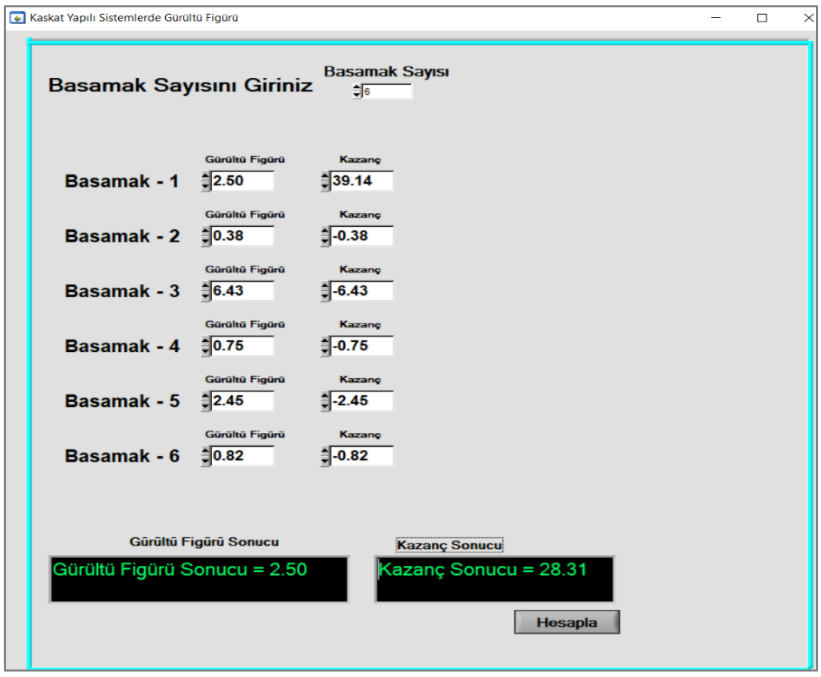
Şekil 5.14. Filtre çıkışı RF kablo

Çizelge 5.2. Birimlerin kazanç / kayıp değerleri

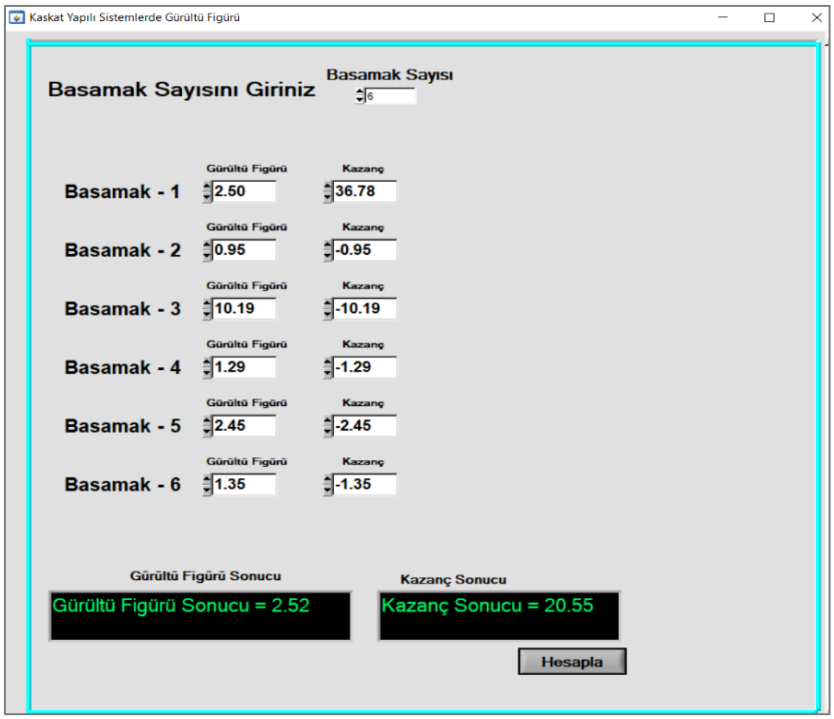
Giriş Frekans (GHz)	RF Yükselteç (dB)	RF yükselteç-Mikser Kablo (dB)	Mikser-Filtre arası (dB)	Filtre çıkışı (dB)	Mikser (dB)	Filtre (dB)	Sistem Kazancı (dB)
7	39,14	-0,38	-0,75	-0,82	-6,43	-2,45	28,31
8	39,2	-0,72	-0,79	-0,81	-4,44	-2,45	29,99
9	38,26	-0,84	-0,83	-0,83	-7,79	-2,45	25,52
10	36,4	-1,37	-1,06	-1,12	-8,85	-2,45	21,55
11	36,65	-0,91	-1,09	-1,19	-10,81	-2,45	20,2
12	36,31	-0,62	-0,96	-1,06	-11,55	-2,45	19,67
13	36,78	-0,95	-1,29	-1,35	-10,19	-2,45	20,55
14	36,64	-1	-1,14	-1,37	-9,17	-2,45	21,51

Almaç tasarımı için kullanılan birimlerin birim bazlı kazanç ve kayıp ölçümleri alınmış ve Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda ulaşılan değerler "Kaskat Yapılı Sistemlerde Gürültü Figürü.exe" yazılımında analiz edilmiş ve teorik olarak ölçülmesi gereken gürültü figürü değerleri yazılım aracı ile hesaplanmıştır. 7 GHz frekansında hesaplanan gürültü figürü Şekil 5.15'te ve 13 GHz frekansında hesaplanan gürültü figürü ise Şekil 5.16'da verilmiştir.



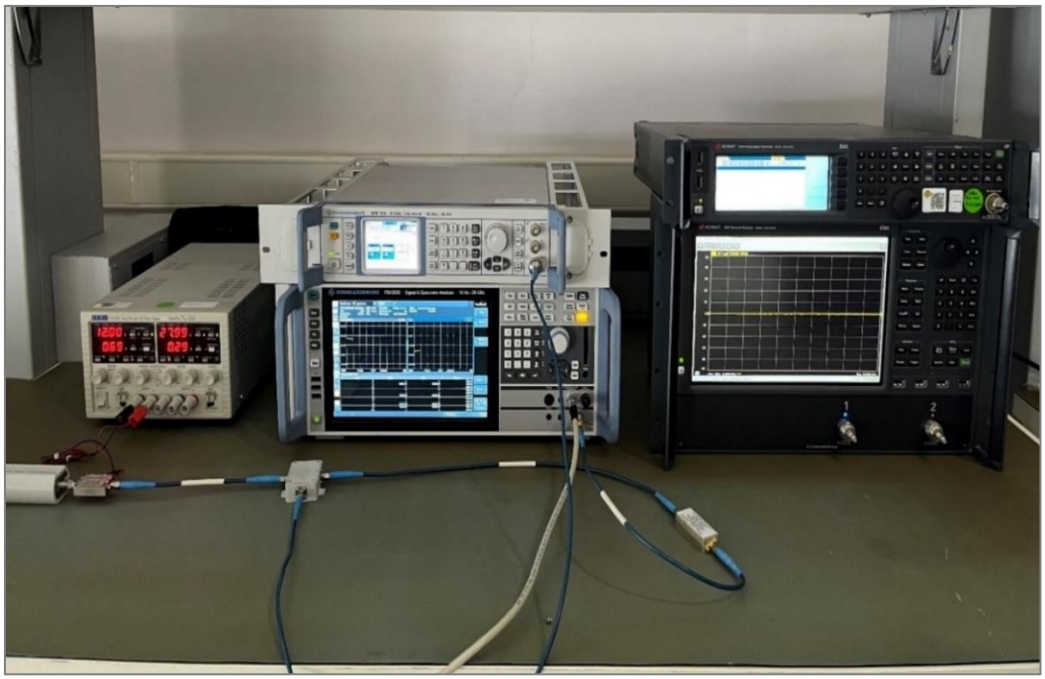
Şekil 5.15. 7 GHz gürültü figürü hesabı



Şekil 5.16. 13 GHz gürültü figürü hesabı

5.2. Ölçüm 1: Spektrum Analizör ve Analizör Opsiyonu ile

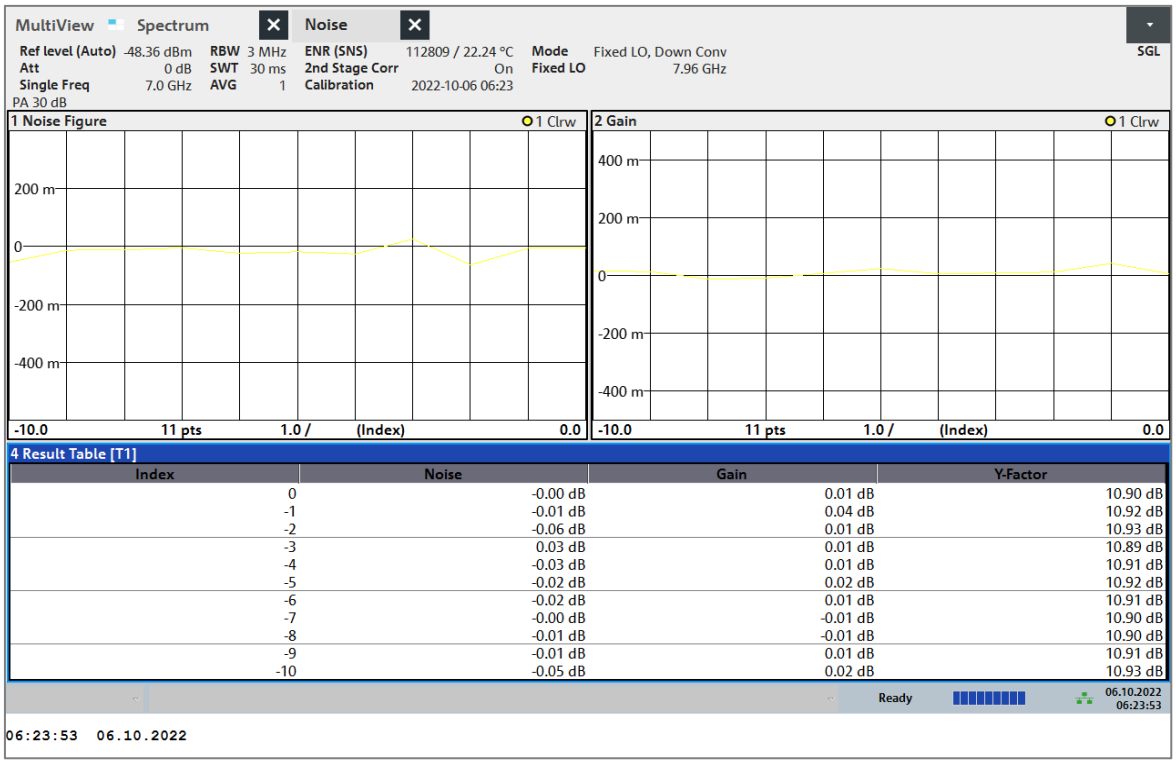
Entegrasyonun ve analizin ardından spektrum analizör ve analizörün gürültü figürü ölçümü özelliğiyle ölçüm alınmıştır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilen test düzenekleri kurulmuş ve Şekil 5.15'te 7 GHz gürültü figürü hesabı verilmiştir. Her bir frekans adımı için testler tekrarlanmıştır. Çizelge 5.3'te alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. Test öncesi yapılan kalibrasyonlar ve tüm frekanslarda alınan ölçümler Şekil 5.18'ten Şekil 5.33'e kadar olan bölümde verilmiştir.



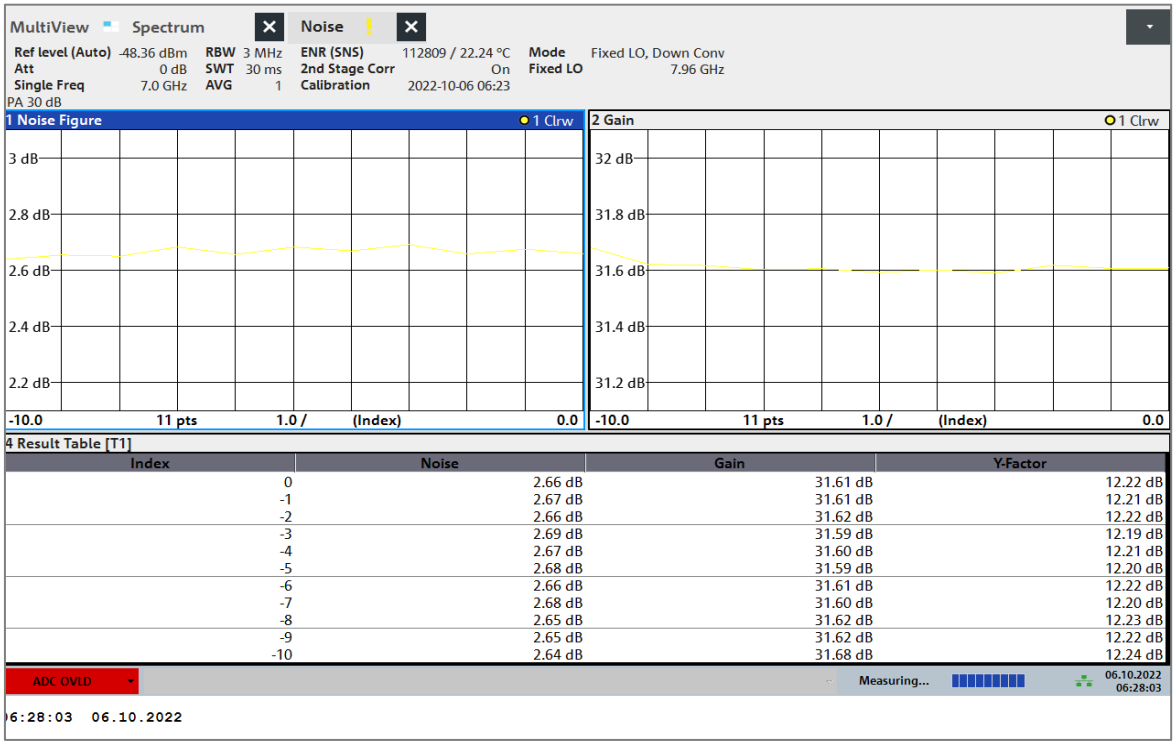
Şekil 5.17. Spektrum analizör özelliği ile gürültü figürü ölçme test düzeneği

Çizelge 5.3. Spektrum analizör ve analizör özelliği ile alınan ölçüm sonuçları

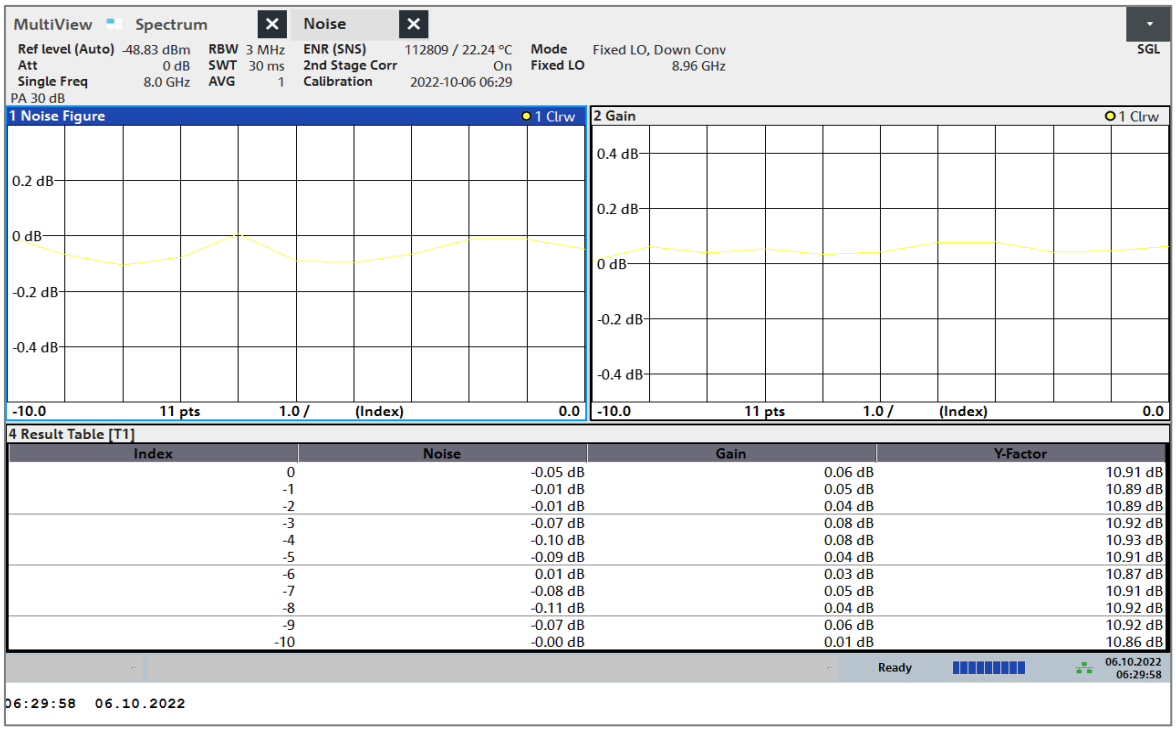
Giriş Frekans (GHz)	AGO (dB)	Çıkış Frekans (MHz)	Lokal Osilatör (GHz)	Gürültü Figürü (dB)
7	14,35	960	7.960	2,66
8	14,3	960	8.960	2,51
9	14,26	960	9.960	2,62
10	14,32	960	10.960	2,62
11	14,35	960	11.960	2,58
12	14,38	960	12.960	2,44
13	14,37	960	13.960	2,45
14	14,48	960	14.960	2,43



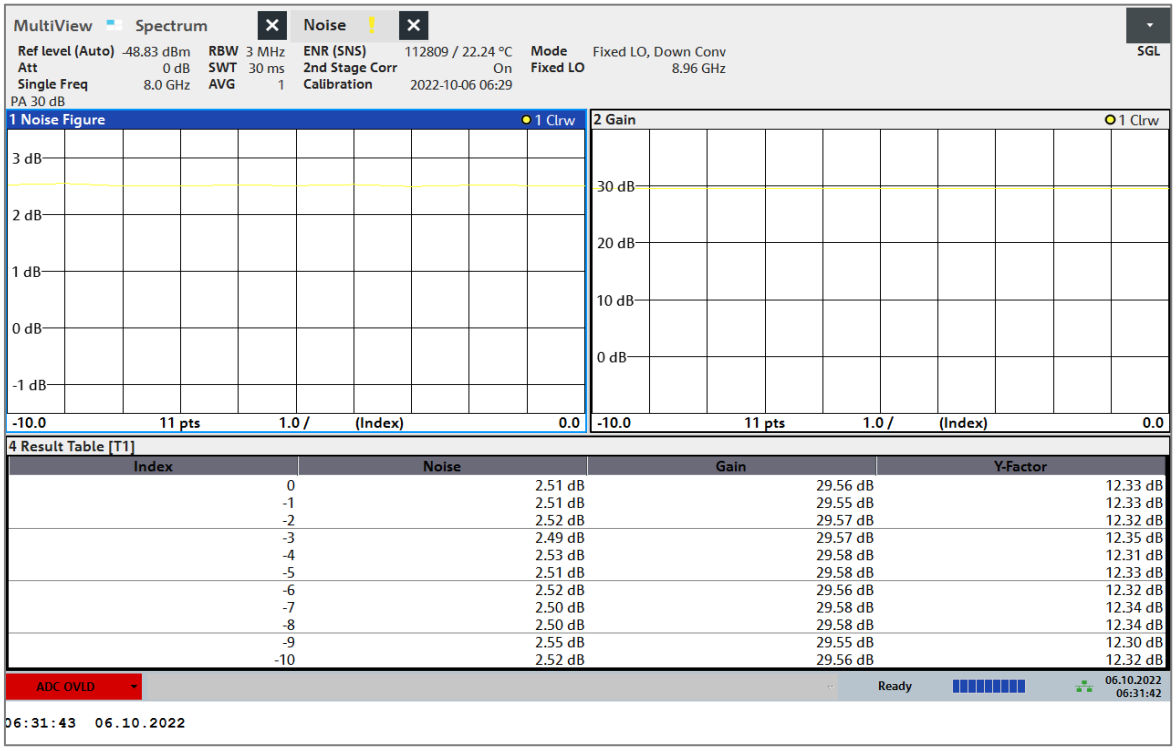
Şekil 5.18. 7 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon



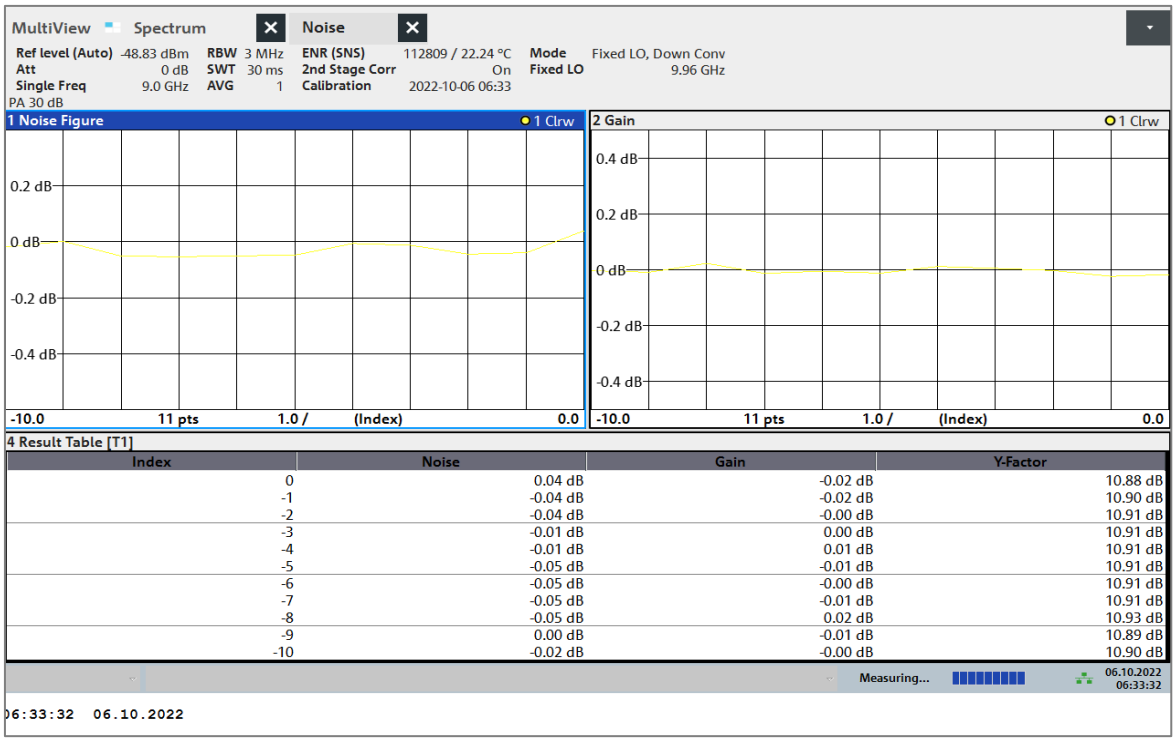
Şekil 5.19. 7 GHz gürültü figürü ölçümü



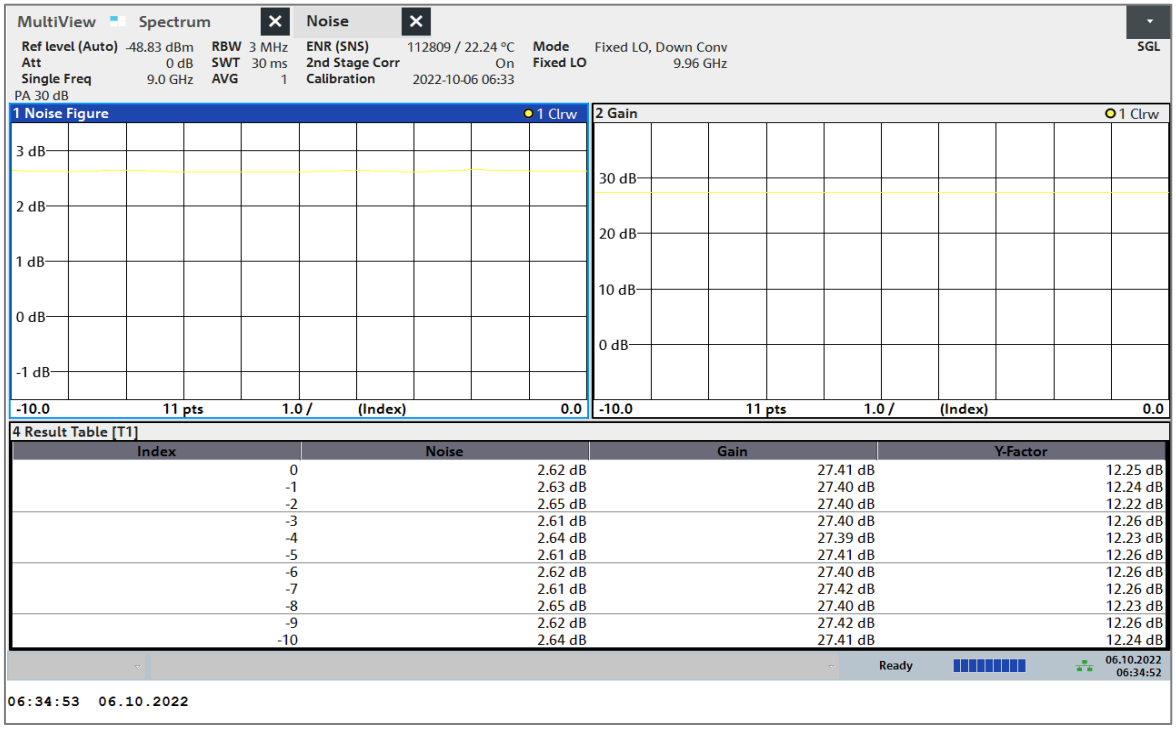
Şekil 5.20. 8 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon



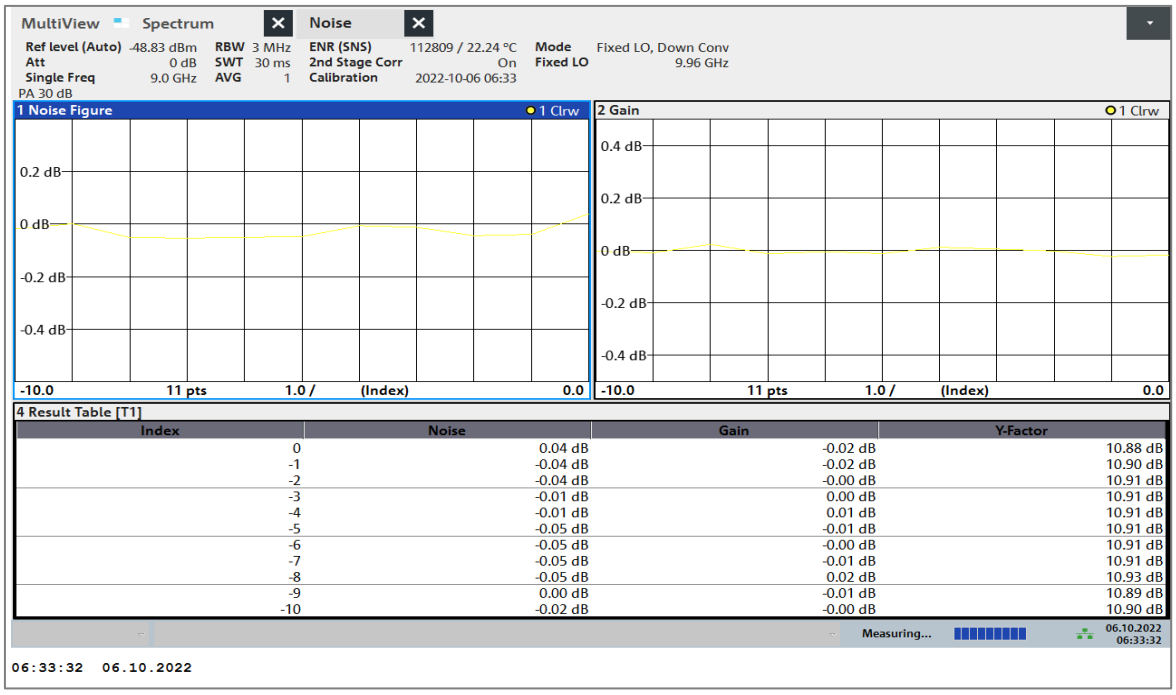
Şekil 5.21. 8 GHz gürültü figürü ölçümü



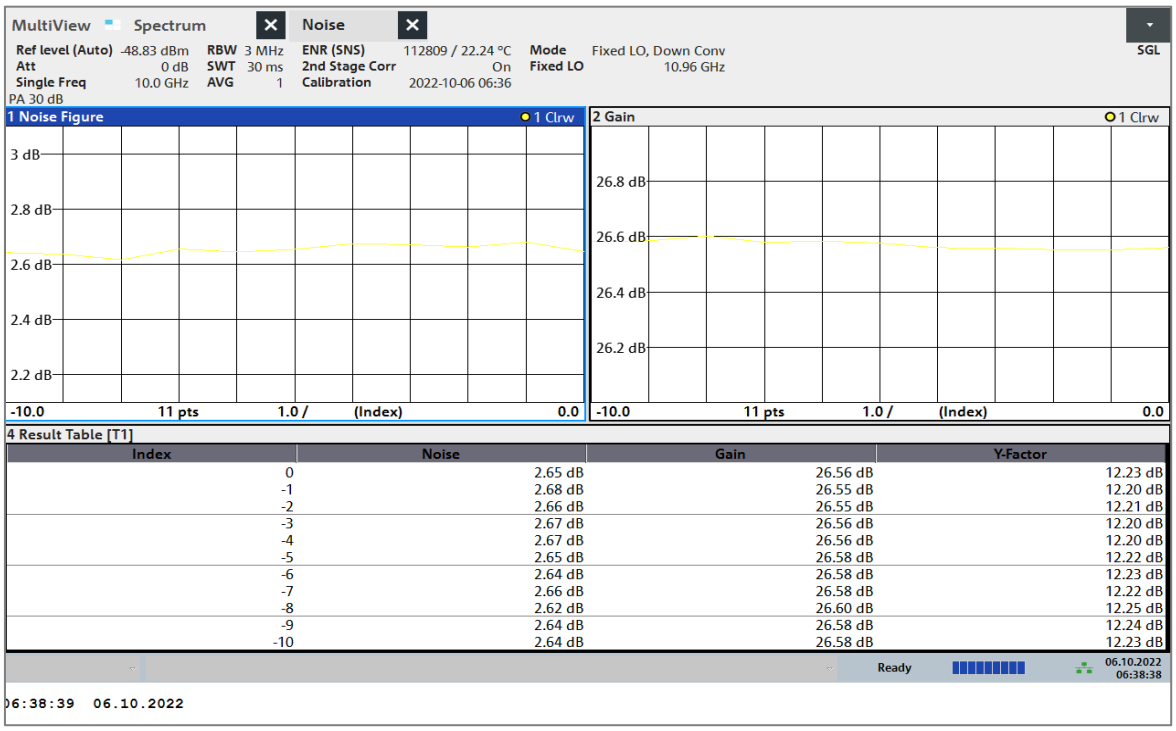
Şekil 5.22. 9 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon



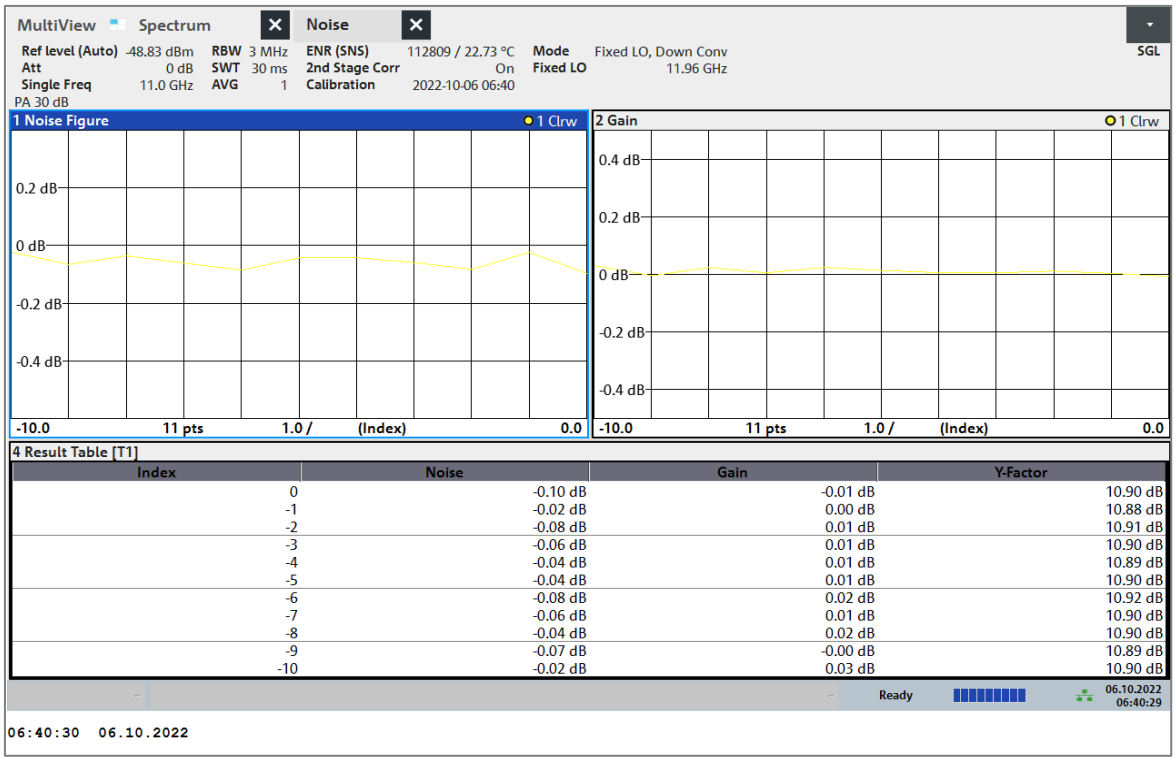
Şekil 5.23. 9 GHz gürültü figürü ölçümü



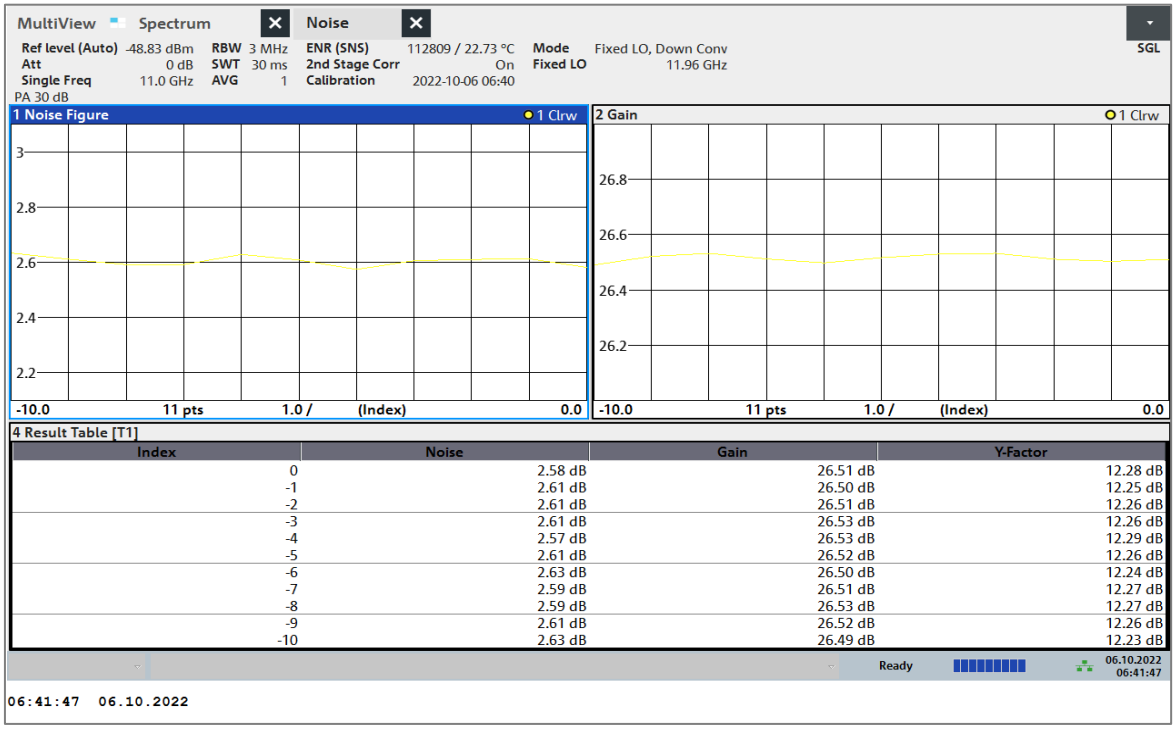
Şekil 5.24. 10 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon



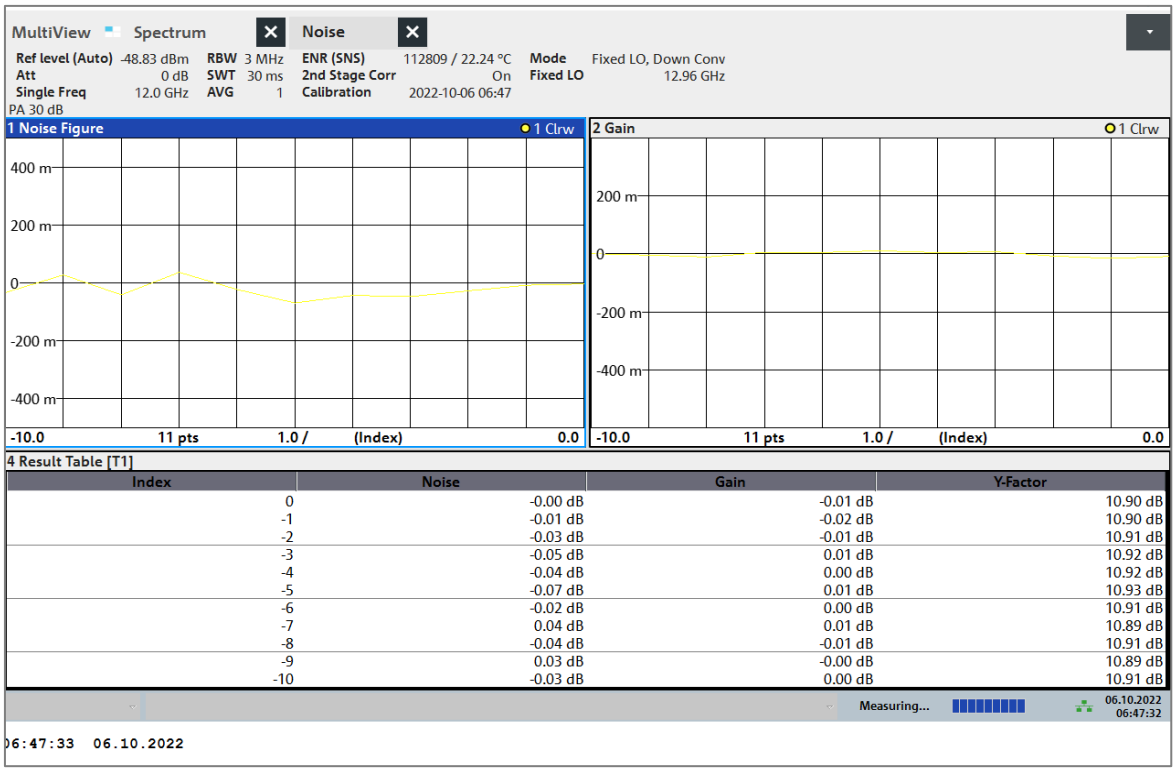
Şekil 5.25. 10 GHz gürültü figürü ölçümü



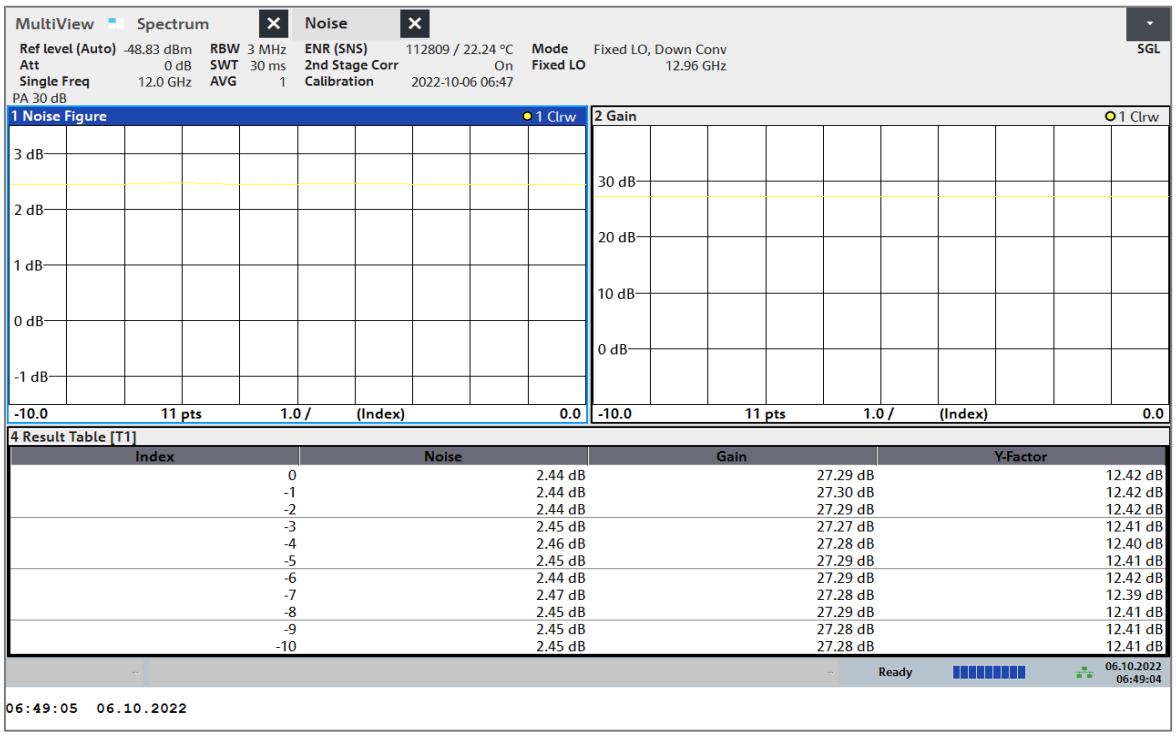
Şekil 5.26. 11 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon



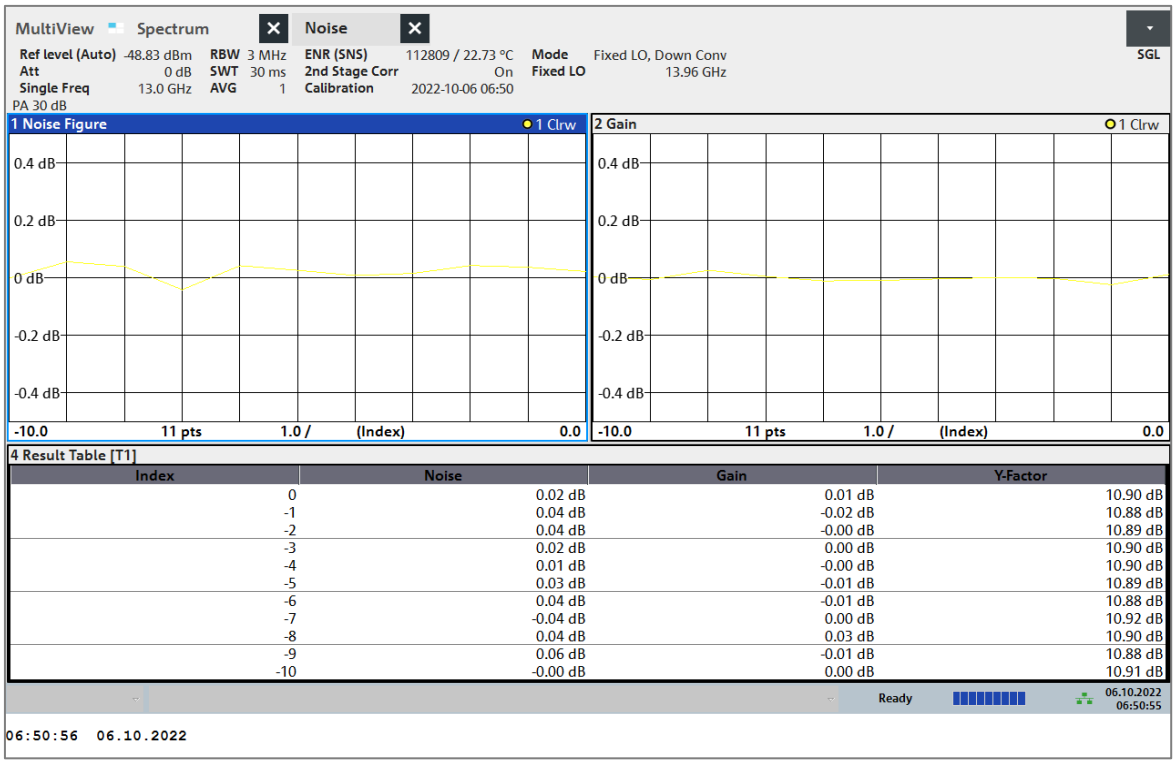
Şekil 5.27. 11 GHz gürültü figürü ölçümü



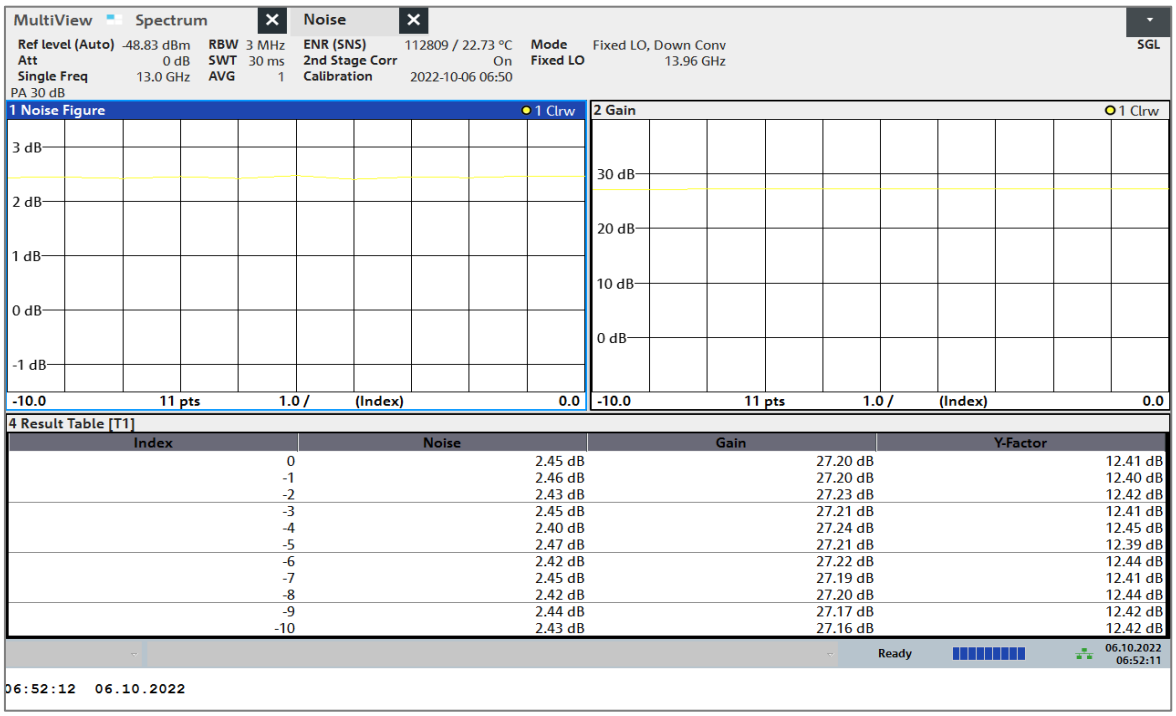
Şekil 5.28. 12 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon



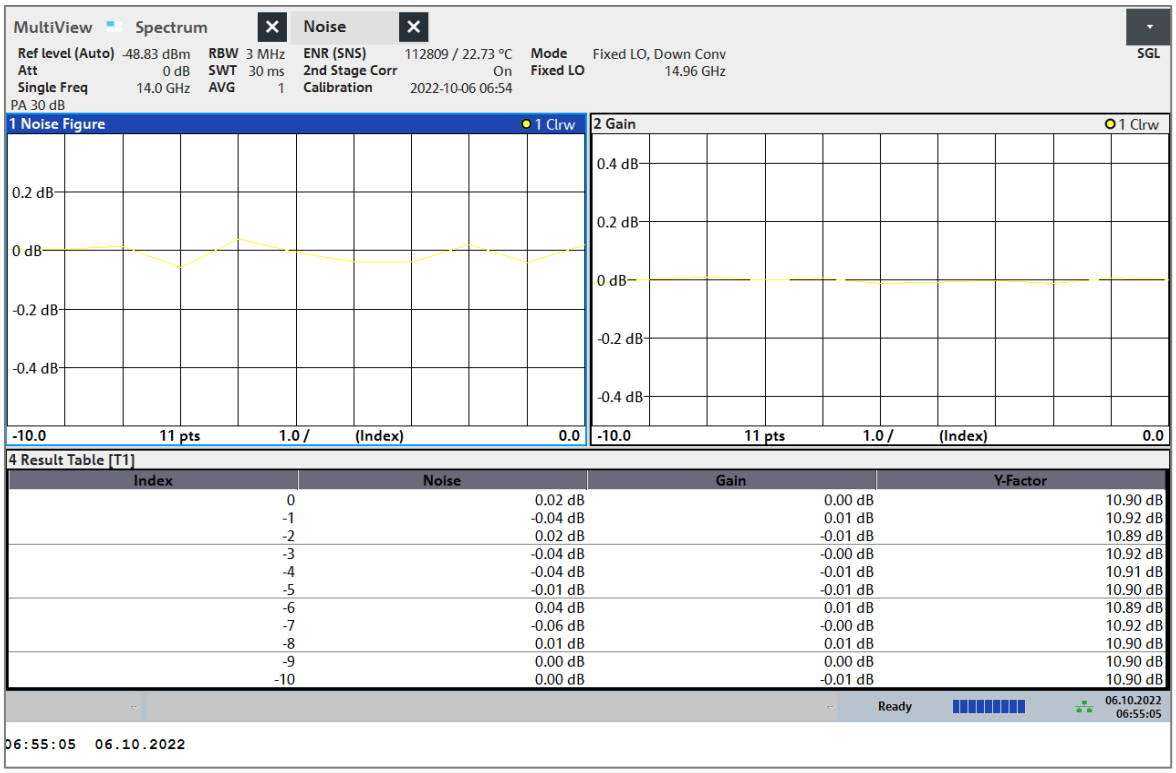
Şekil 5.29. 12 GHz gürültü figürü ölçümü



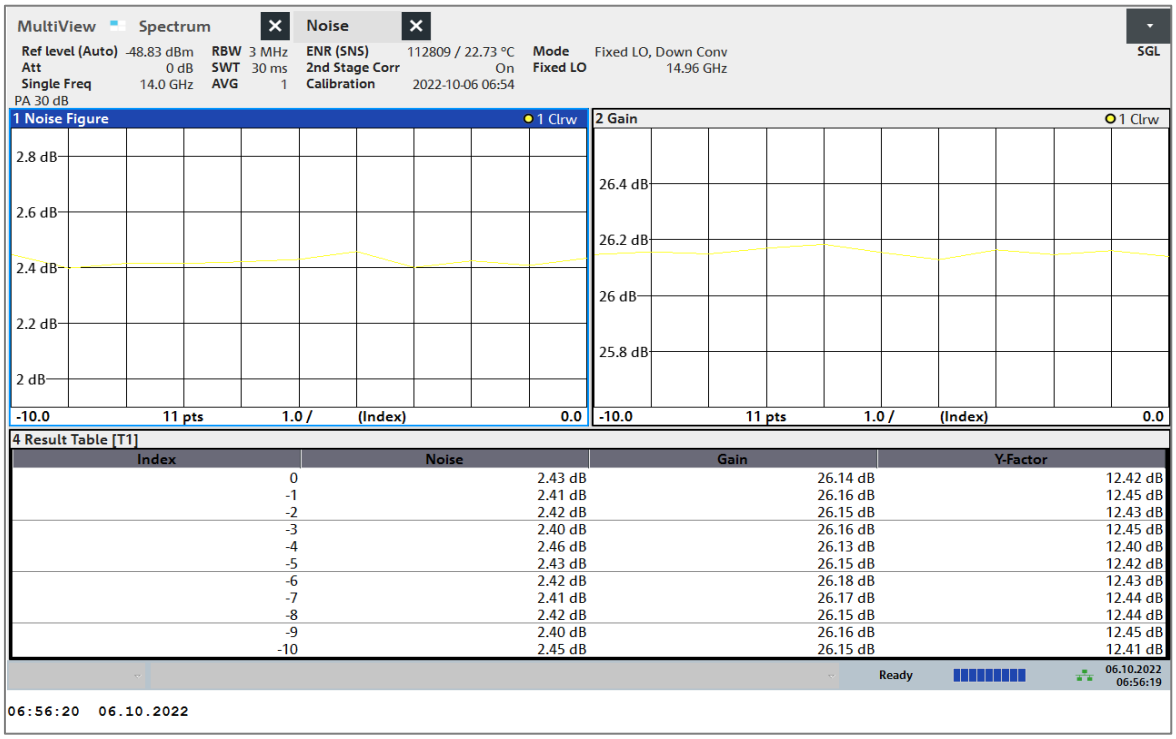
Şekil 5.30. 13 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon



Şekil 5.31. 13 GHz gürültü figürü ölçümü



Şekil 5.32. 14 GHz gürültü figürü ölçüm öncesi kalibrasyon

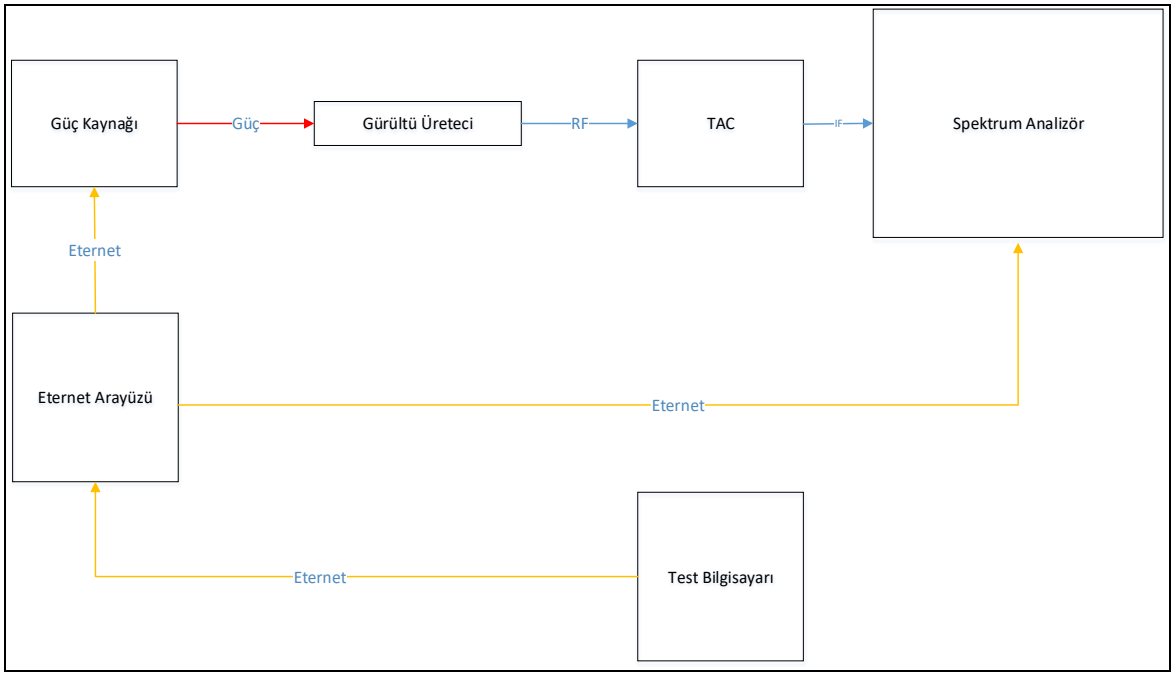


Şekil 5.33. 14 GHz gürültü figürü ölçümü

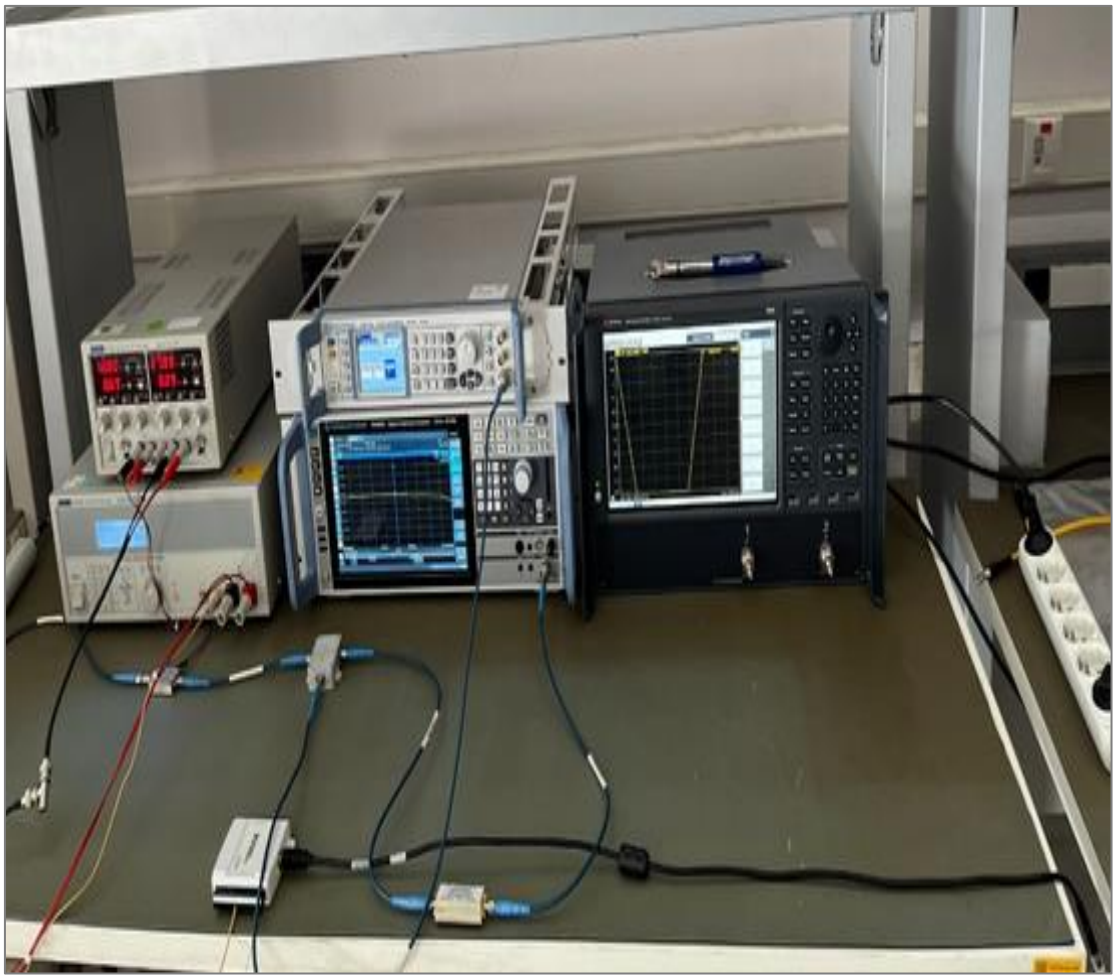
5.3. Ölçüm 2: Y-Faktör Metodu Alternatif Test Düzeneği ile

İkinci ölçümde yukarıda bahsedildiği gibi spektrum analizör ve Y – faktör metodu kullanılmıştır. Aynı yöntemle Y- faktör metodu kullanılarak fakat farklı bir test düzeneği ile gürültü figürü ölçümleri tekrarlanmıştır.

Şekil 5.34'te test düzeneğinin şematiği ve Şekil 5.35'te kurulan test düzeneği verilmiştir. Çizelge 5.4'te ölçüm sonuçları detaylı verilmiştir. Gürültü üretecinin kontrolü spektrum analizör ile değil, test bilgisayarı ile yapılmıştır. Güç kaynağının çıkışı 28 Volt'a ayarlandığında Phot değerleri, çıkışı kapatıldığında ise Pcold değerleri 7-14 GHz frekans aralığında ayrı ayrı alınmıştır. Şekil 5.36'dan Şekil 5.51'e kadar olan görsellerde alınan ölçümlerin sonuçları verilmiştir. Böylece test düzeneği kurulmadan önce yapılan kalibrasyonla ve sök tak yapmadan ölçümler alınmıştır.



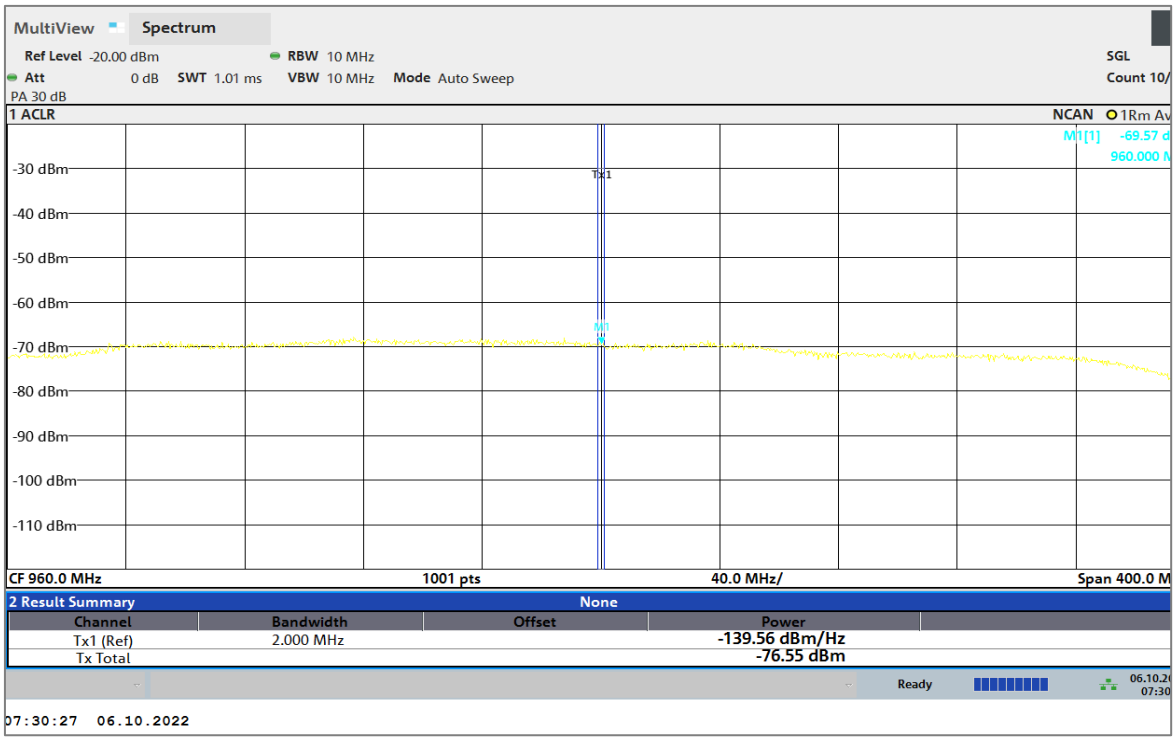
Şekil 5.34. Y- Faktör alternatif olarak kurulacak test düzeneği



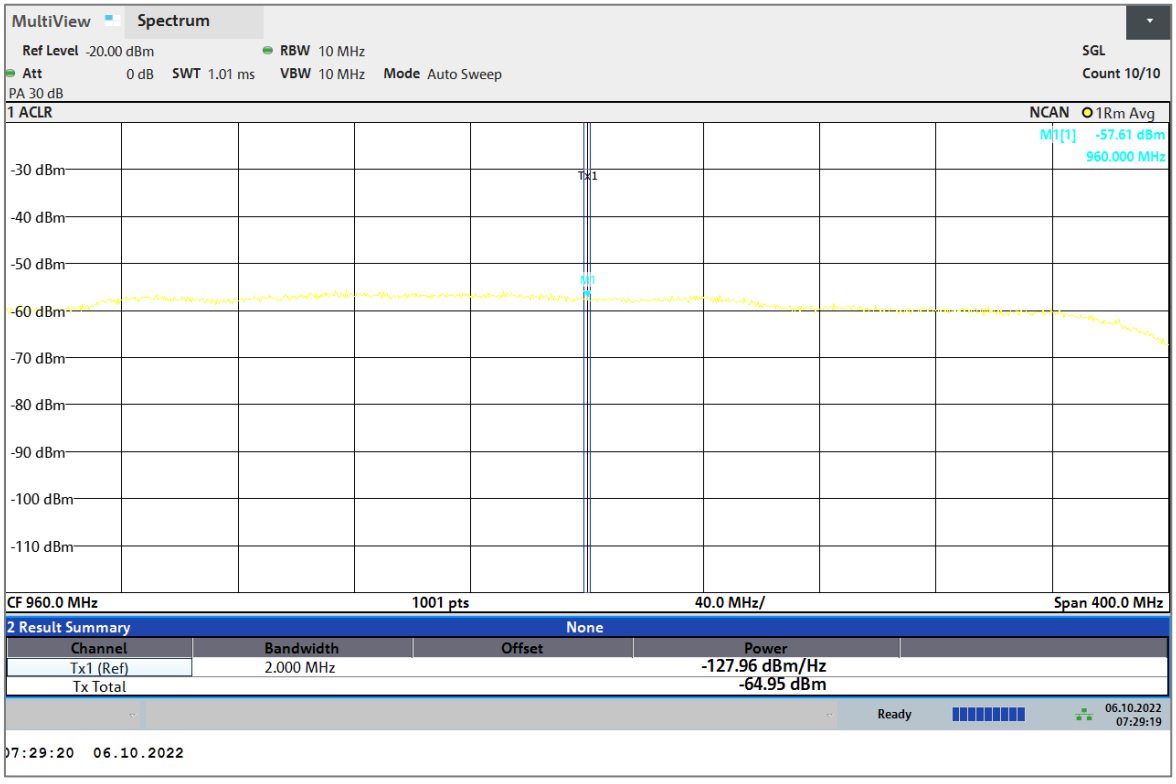
Şekil 5.35. Y-faktör alternatif kurulan test düzeneği

Çizelge 5.4. Alternatif test düzeneği ile alınan gürültü figürü ölçüm sonuçları

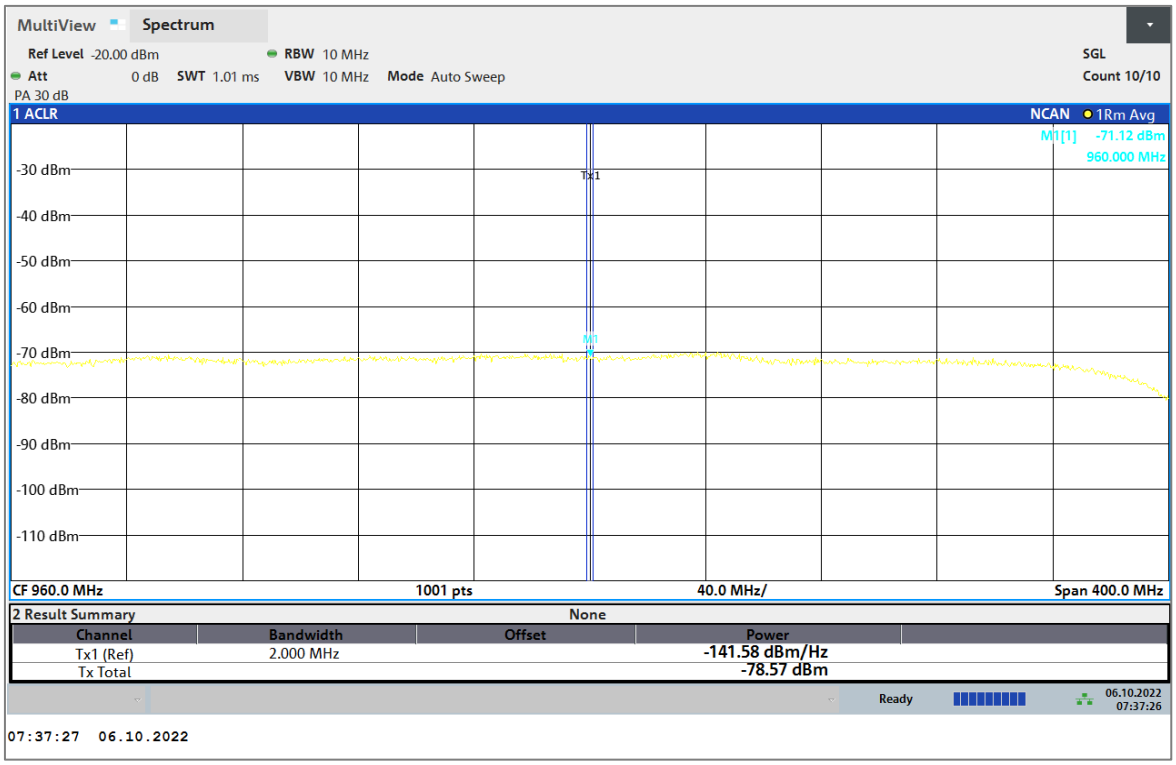
Giriş Frekans (GHz)	AGO (dB)	Çıkış Frekans (MHz)	Lokal Osilatör (GHz)	Phot (dBm / Hz)	Pcold (dBm / Hz)	Gürültü Figürü (dB)
7	16,08	960	7.960	-127,96	-139,56	2,75
8	15,82	960	8.960	-129,9	-141,58	2,62
9	15,77	960	9.960	-132,17	-143,9	2,53
10	15,8	960	10.960	-132,72	-144,43	2,61
11	15,83	960	11.960	-132,91	-144,72	2,54
12	15,75	960	12.960	-132,4	-144,36	2,42
13	15,58	960	13.960	-132,47	-144,44	2,4
14	15,43	960	14.960	-132,83	-144,89	2,42



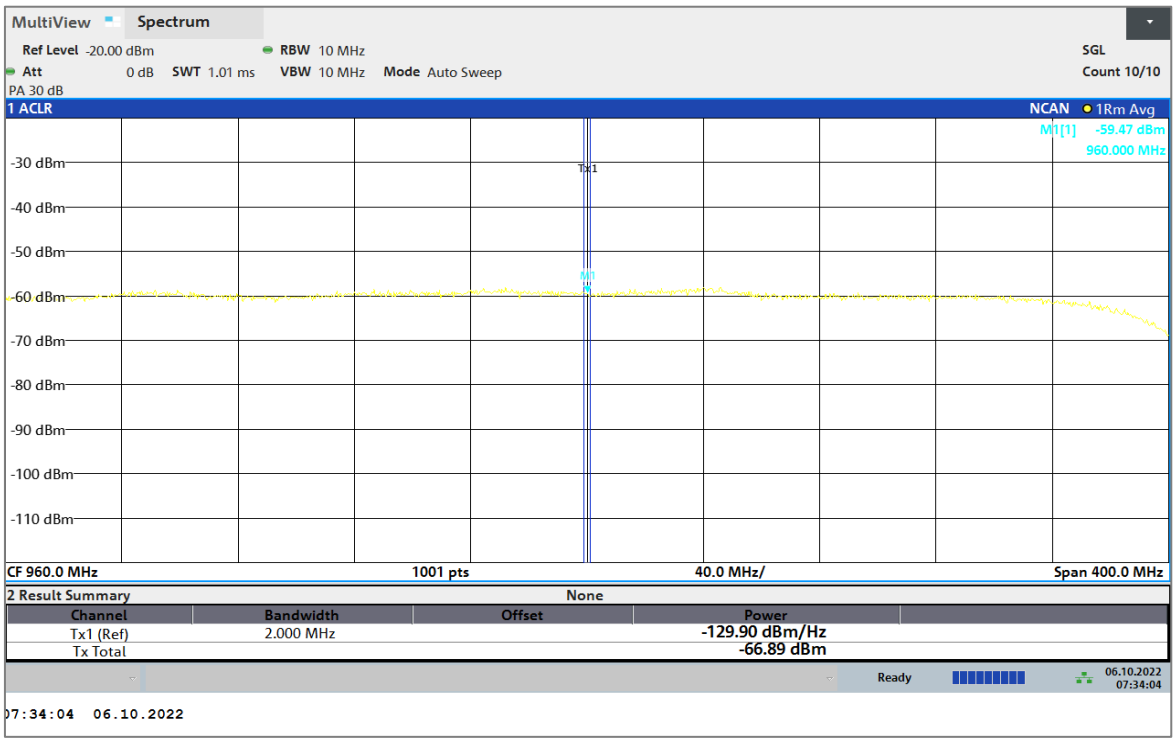
Şekil 5.36. 7 GHz Pcold ölçüm değeri



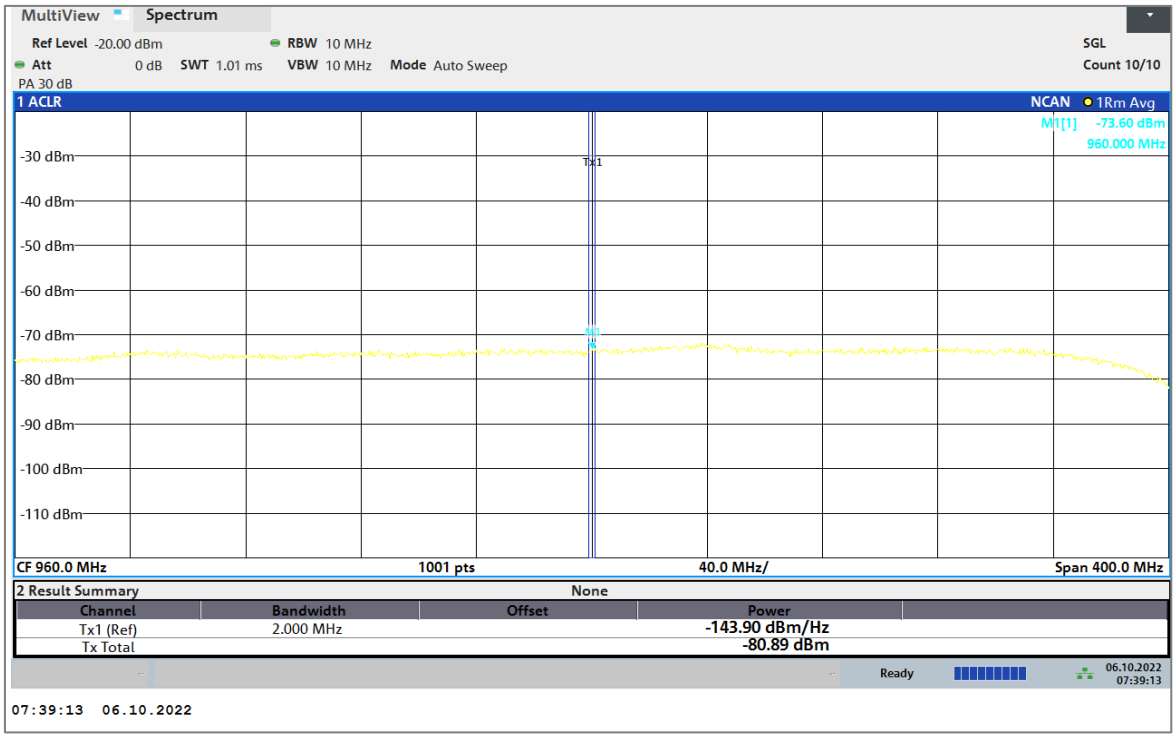
Şekil 5.37. 7 GHz Phot ölçüm değeri



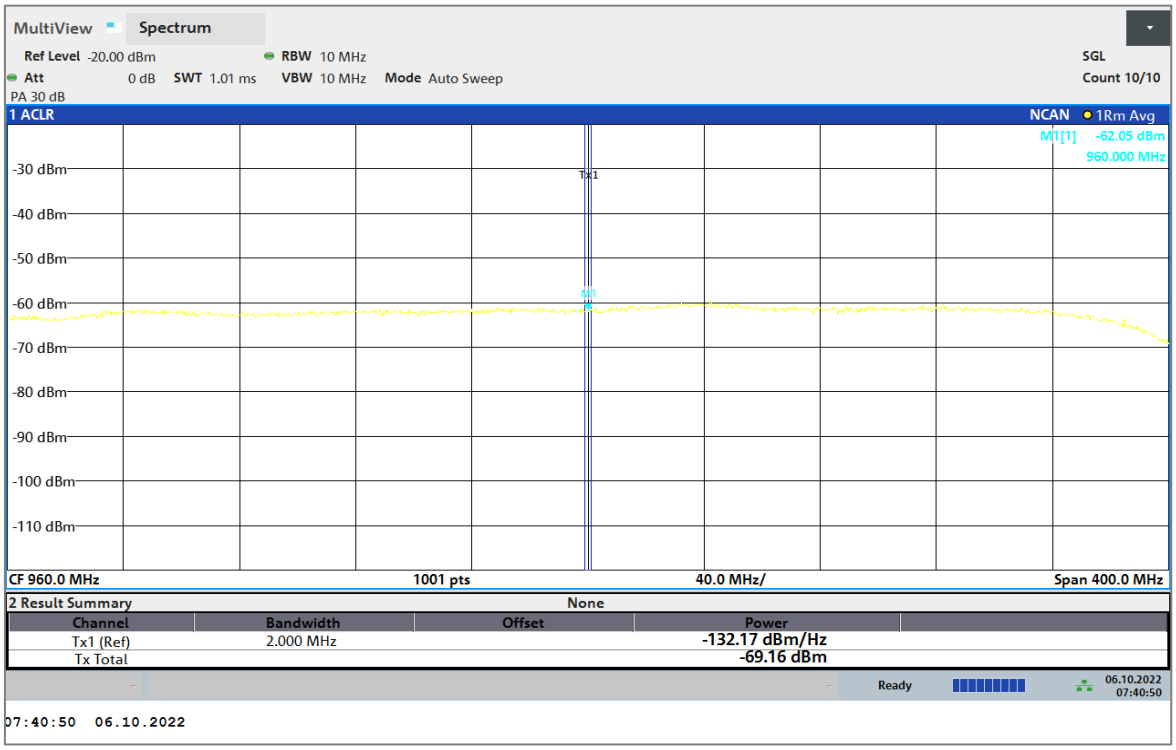
Şekil 5.38. 8 GHz Pcold ölçüm değeri



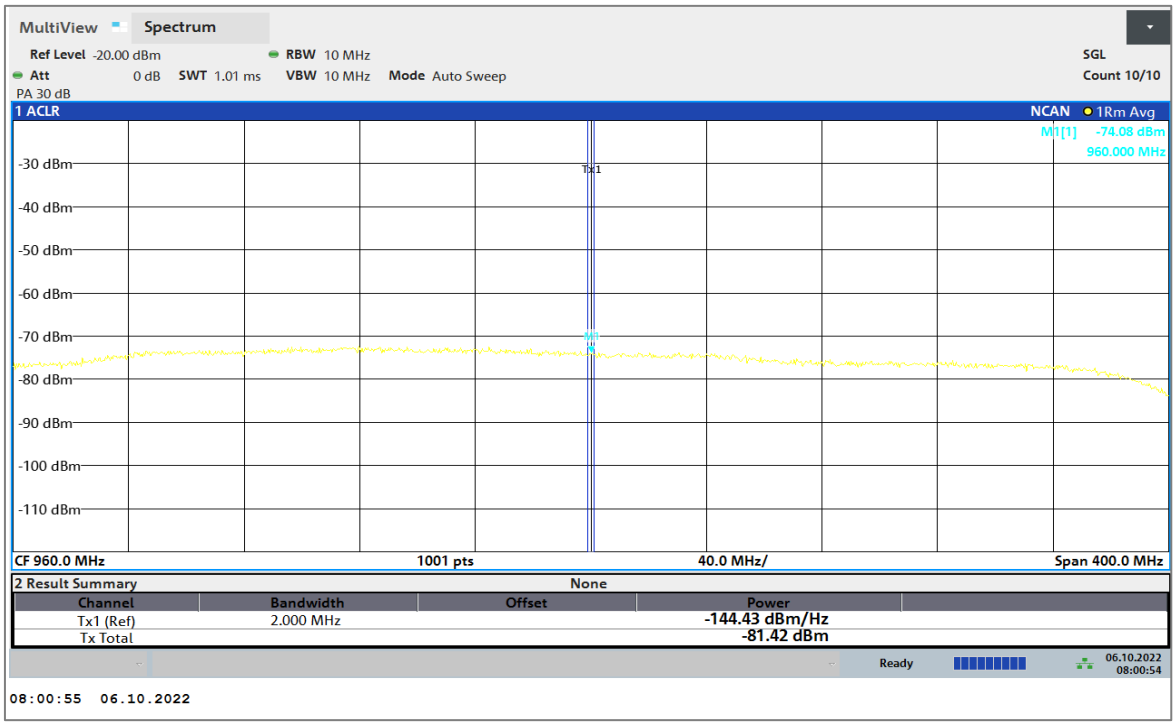
Şekil 5.39. 8 GHz Phot ölçüm değeri



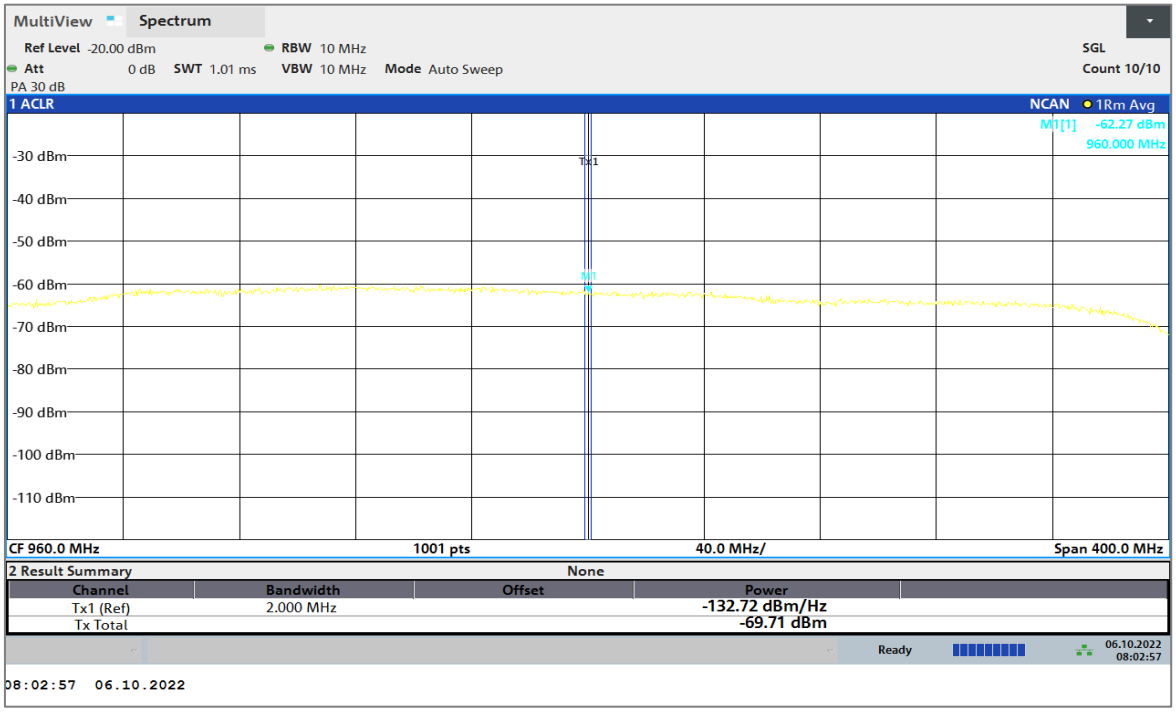
Şekil 5.40. 9 GHz Pcold ölçüm değeri



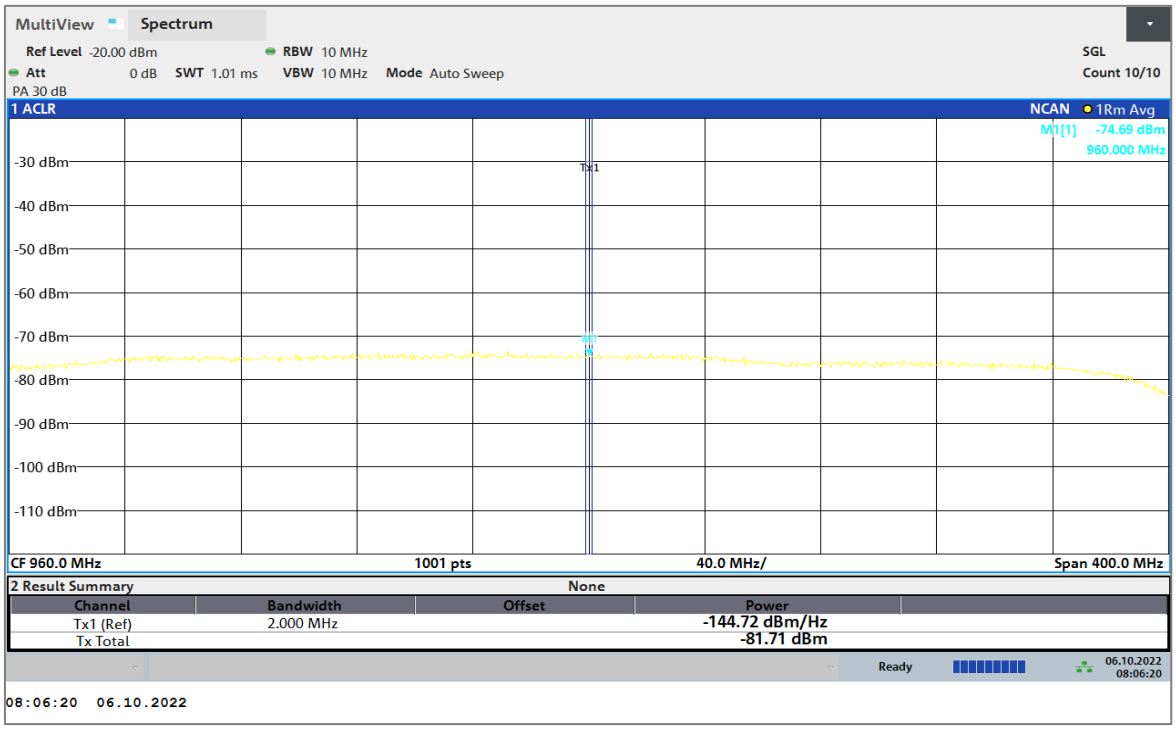
Şekil 5.41. 9 GHz Phot ölçüm değeri



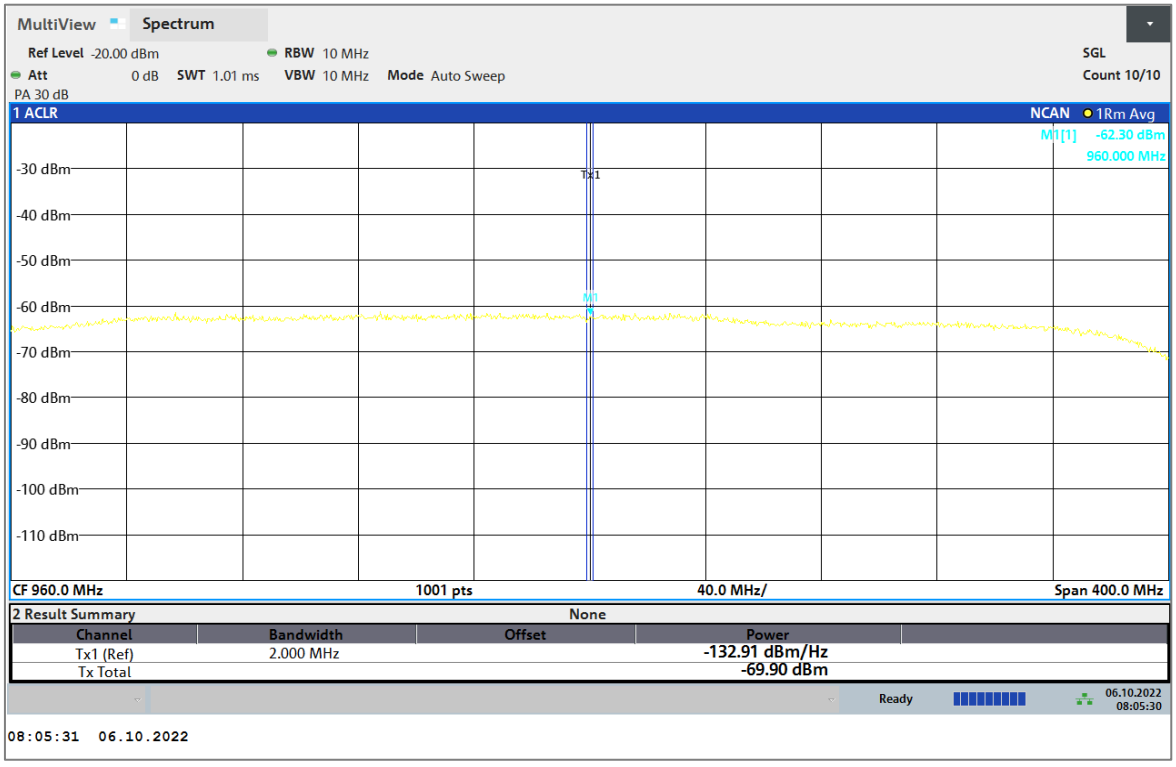
Şekil 5.42. 10 GHz Pcold ölçüm değeri



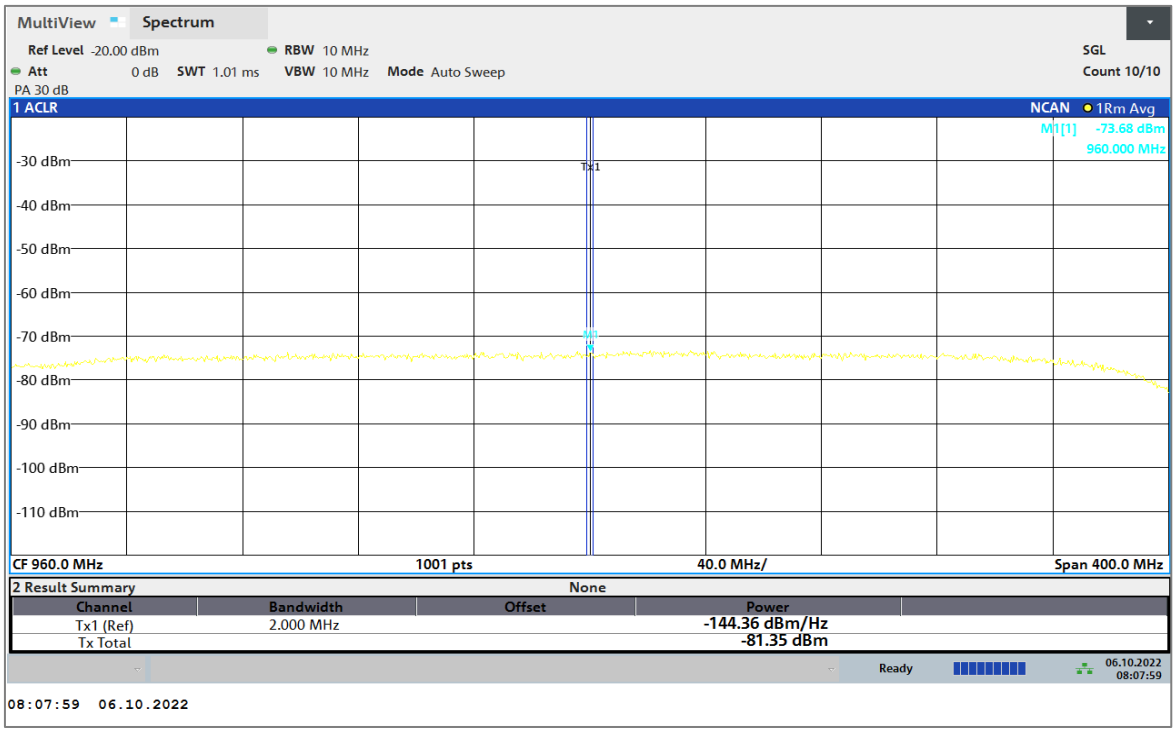
Şekil 5.43. 10 GHz Phot ölçüm değeri



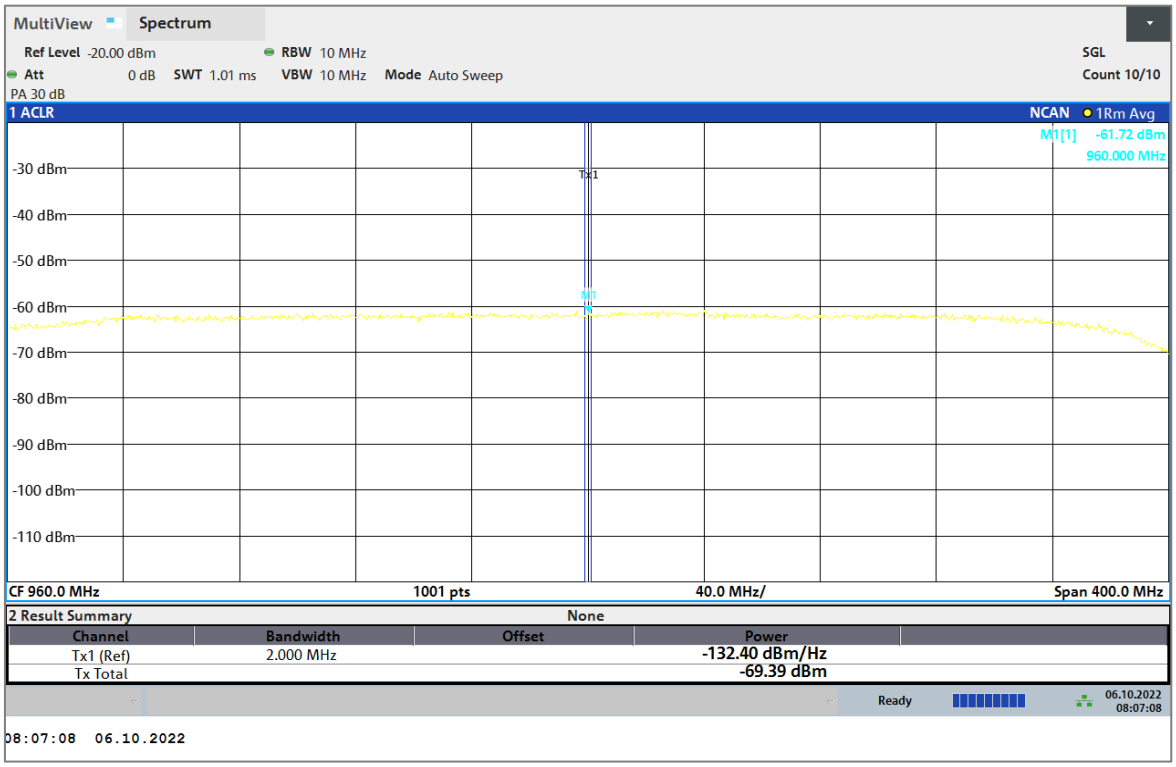
Şekil 5.44. 11 GHz Pcold ölçüm değeri



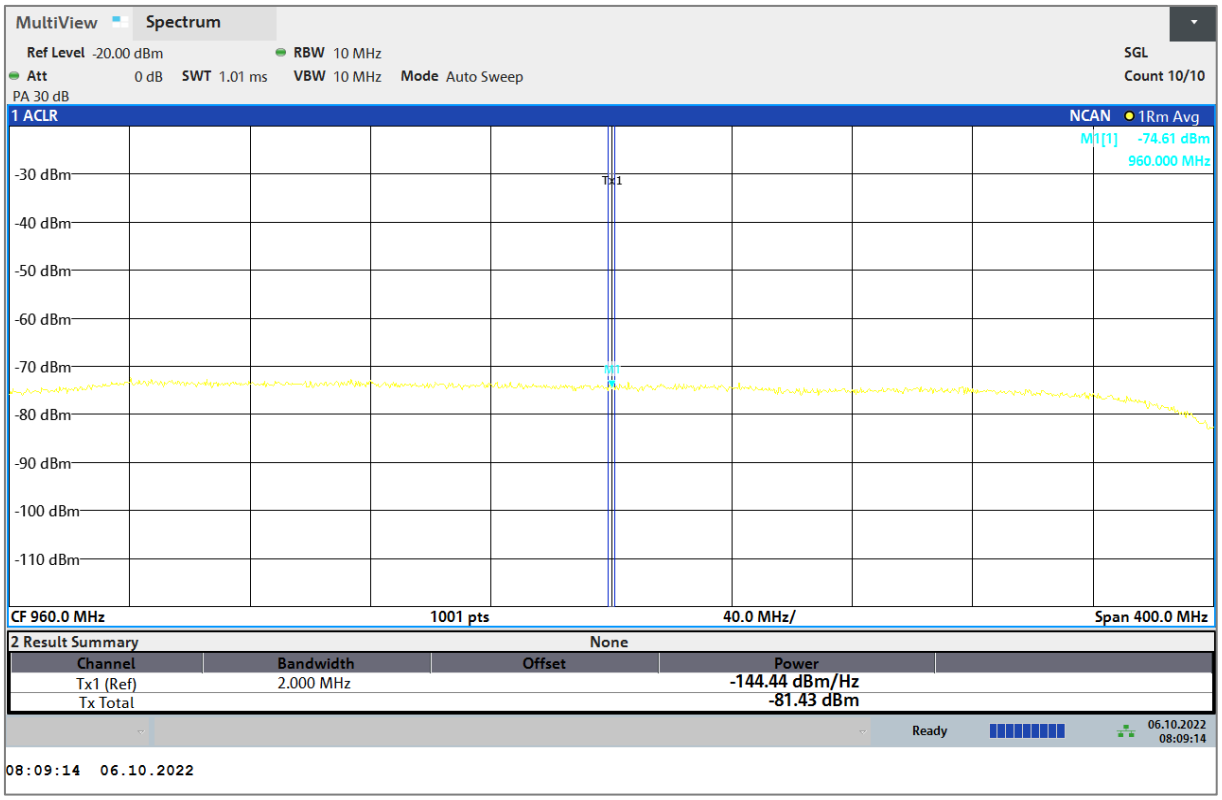
Şekil 5.45. 11 GHz Phot ölçüm değeri



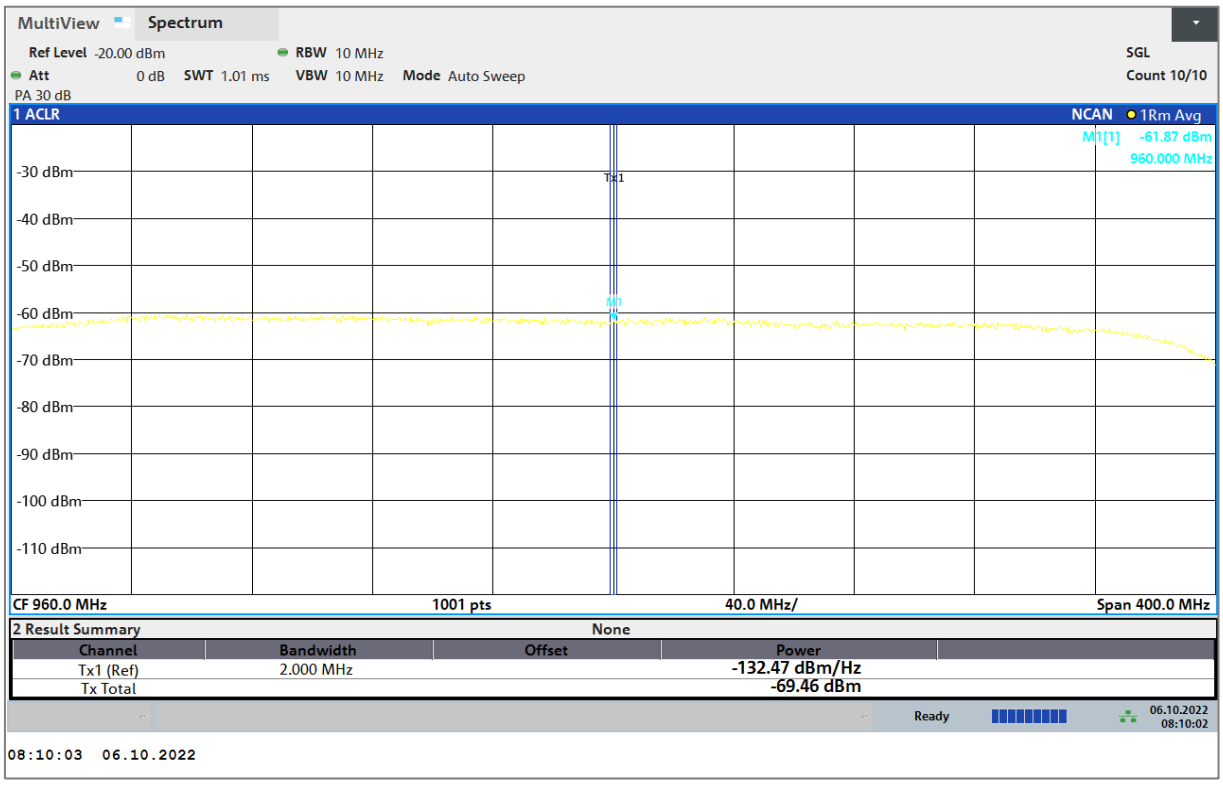
Şekil 5.46. 12 GHz Pcold ölçüm değeri



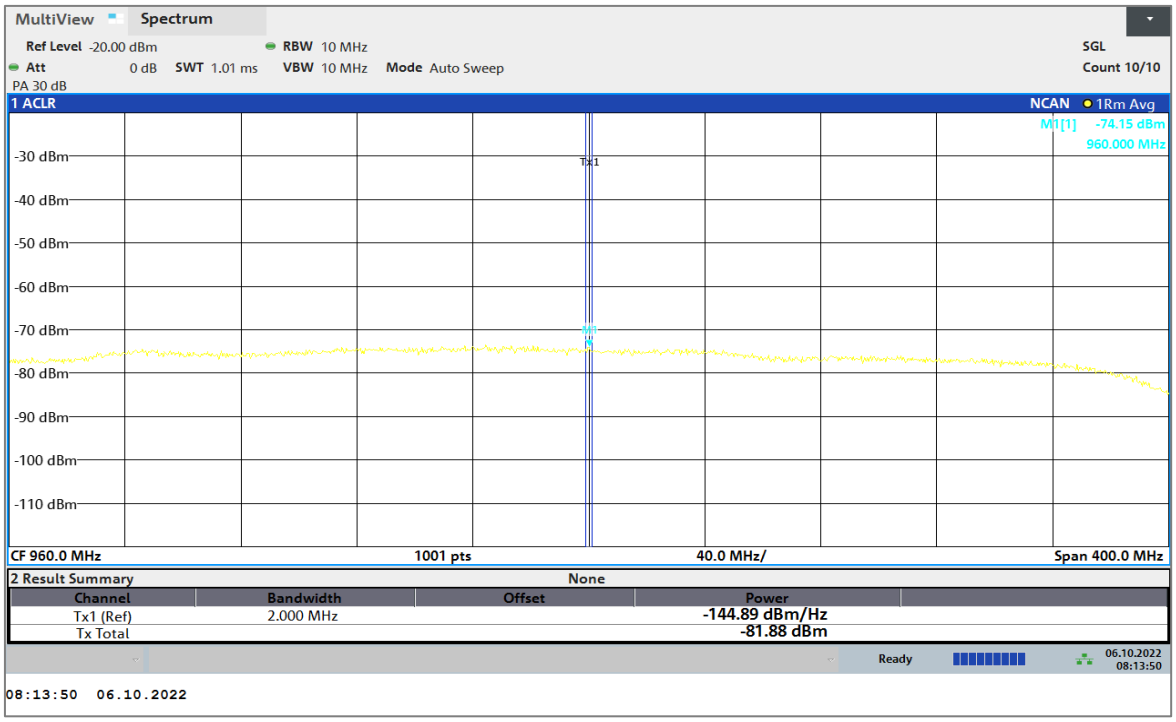
Şekil 5.47. 12 GHz Phot ölçüm değeri



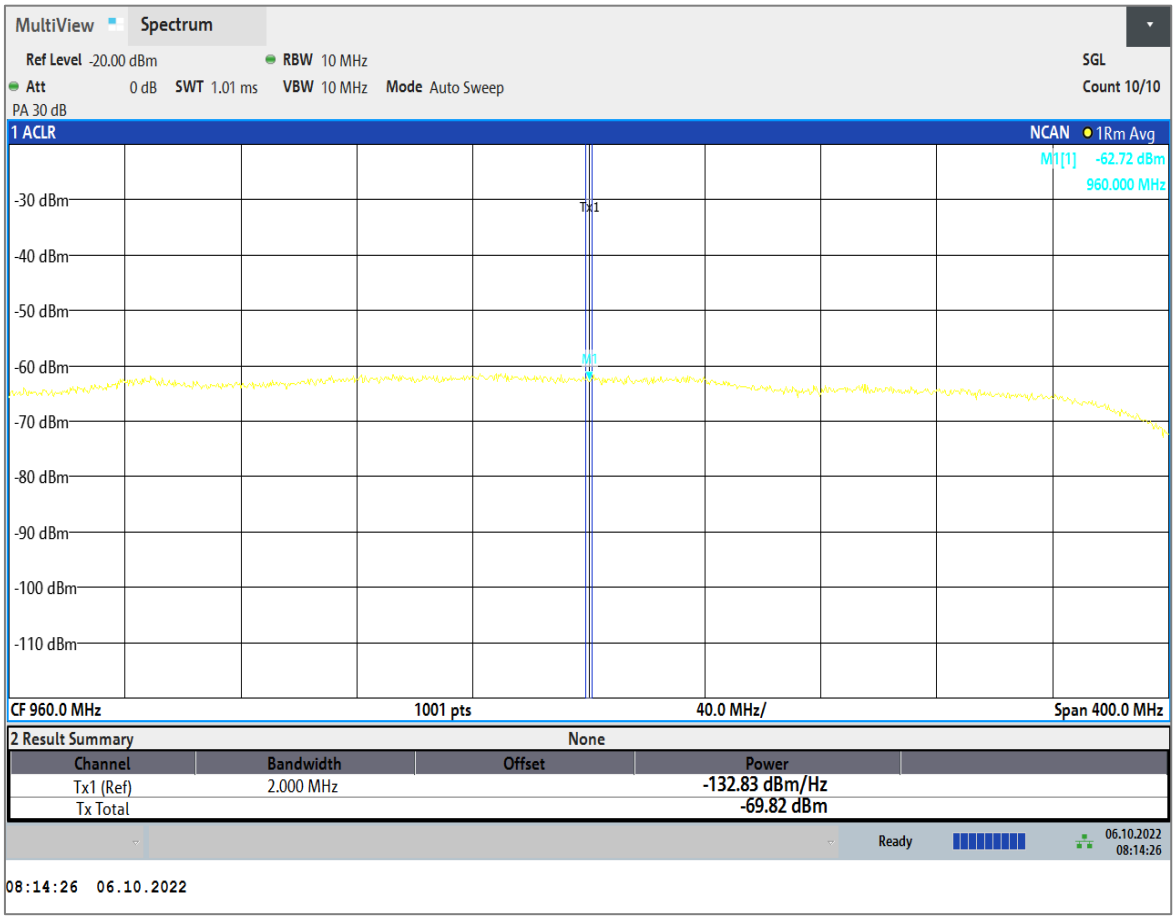
Şekil 5.48. 13 GHz Pcold ölçüm değeri



Şekil 5.49. 13 GHz Phot ölçüm değeri



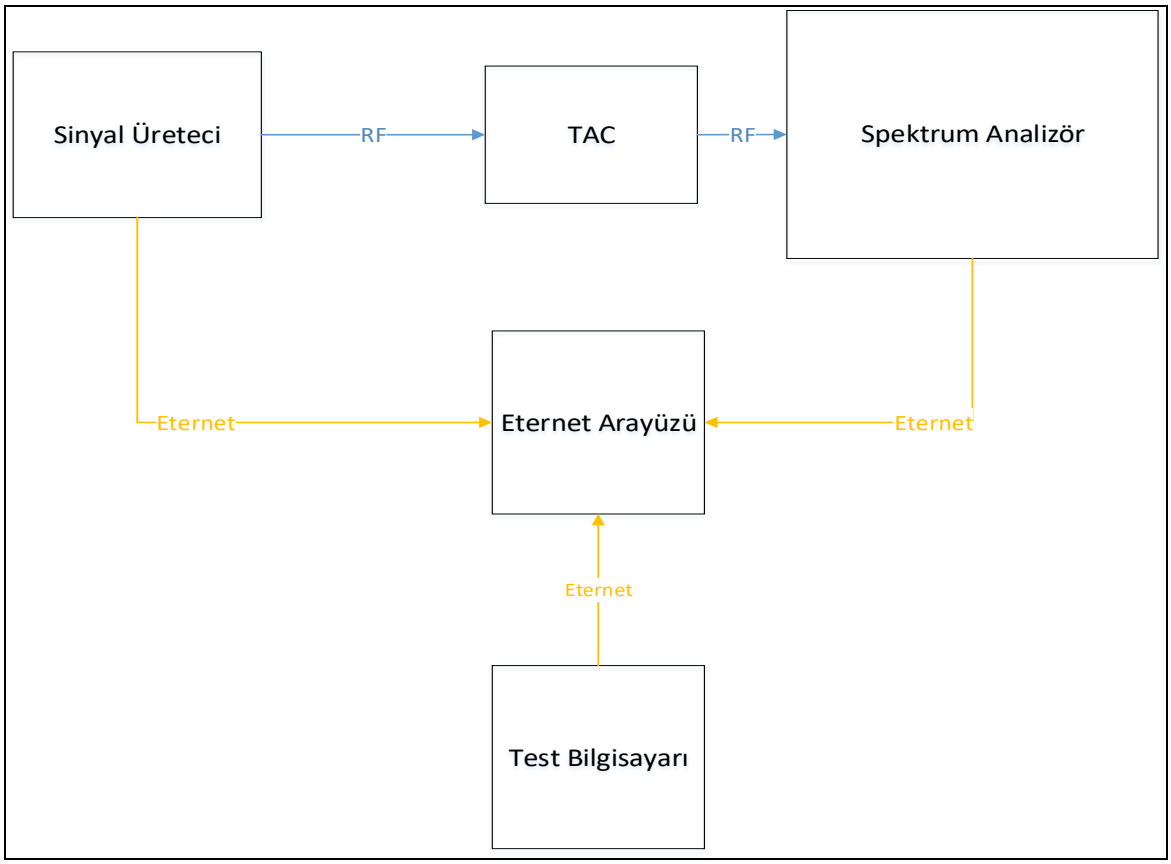
Şekil 5.50. 14 GHz Pcold ölçüm değeri



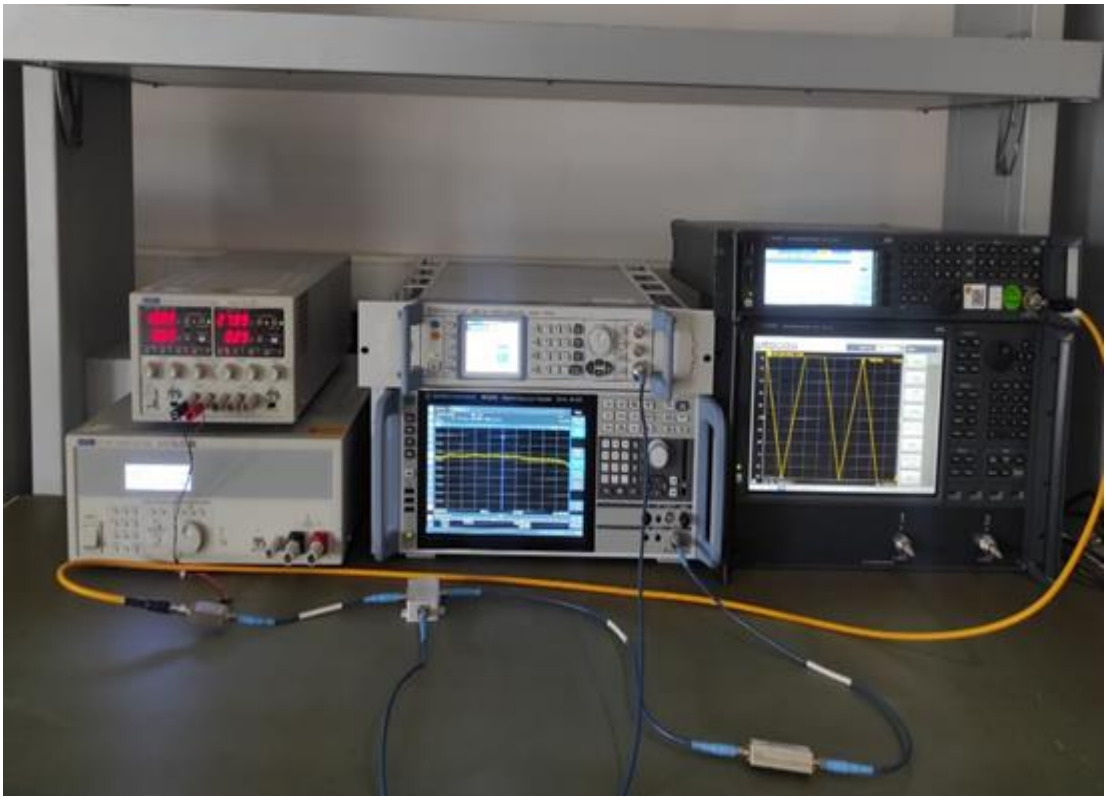
Şekil 5.51. 14 GHz Phot ölçüm değeri

5.4. Ölçüm 3: Kazanç Metodu ile

Y- faktör ile alınan ölçümler sonrasında kazanç metodu kullanılarak her bir frekans adımı için ölçümler alınmıştır. Şekil 5.52'de yer verilen test blok şema örneği kurulmuştur ve kurulan test düzeneği Şekil 5.53'te verilmiştir. Eş. 4.1'de verilen denklem ile gürültü figürü değerleri hesaplanmıştır. Gürültü figürü ölçüm sonuçları Çizelge 5.5'te verilmiştir. 7-14 GHz frekans aralığında elde edilen ölçümler (kazanç, Phot ve Pcold değerleri) Şekil 5.54 ile Şekil 5.69 arasında görülmektedir.



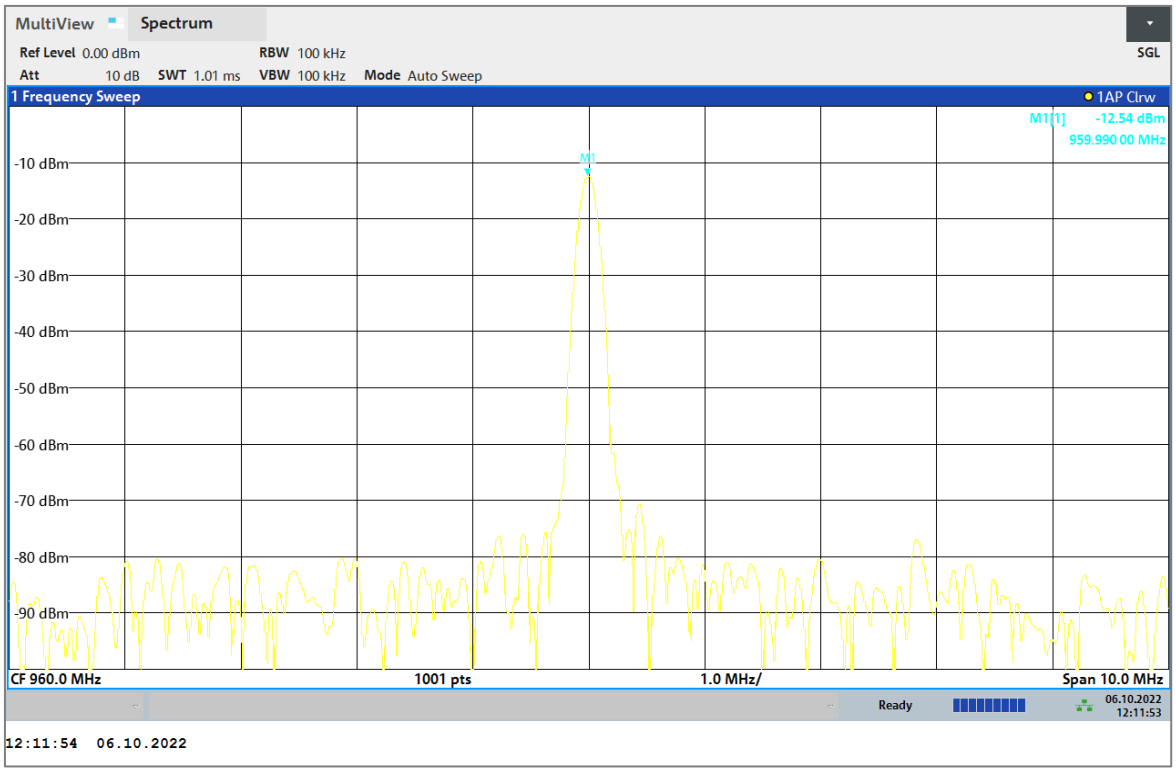
Şekil 5.52. Kazanç metodu için kurulacak test blok şema



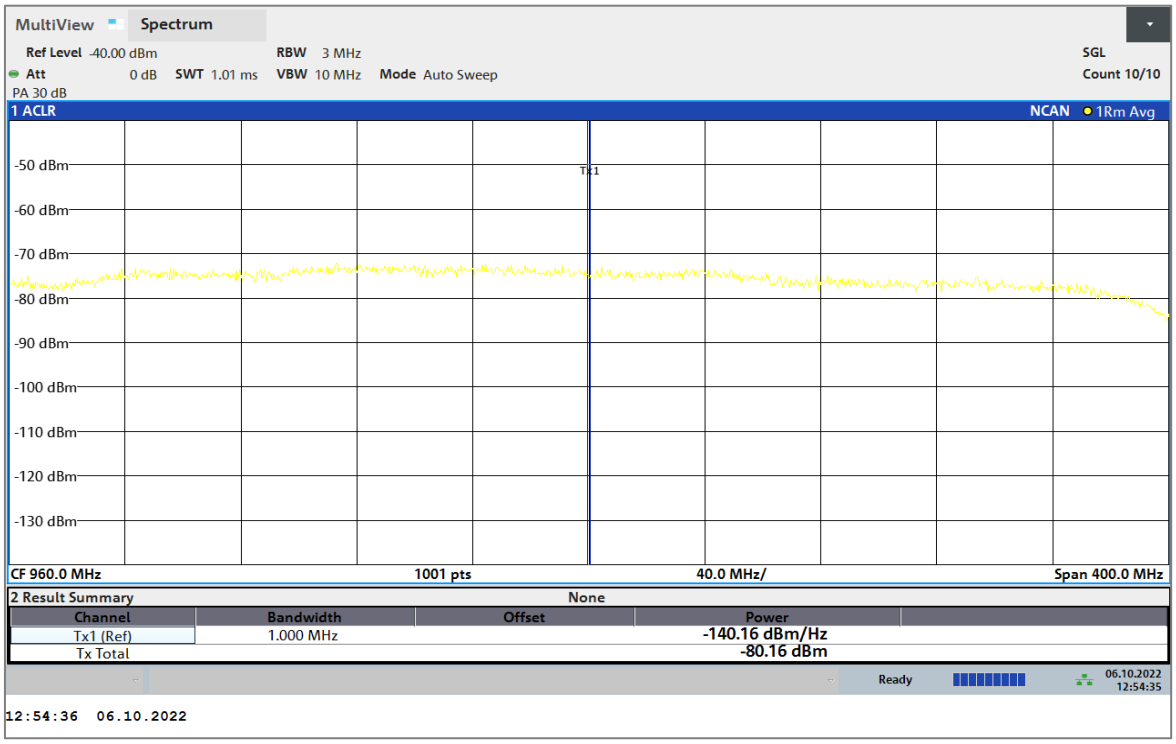
Şekil 5.53. Kazanç metodu için kurulan test düzeneği

Çizelge 5.5. Kazanç metodu ile alınan gürültü figürü ölçümleri

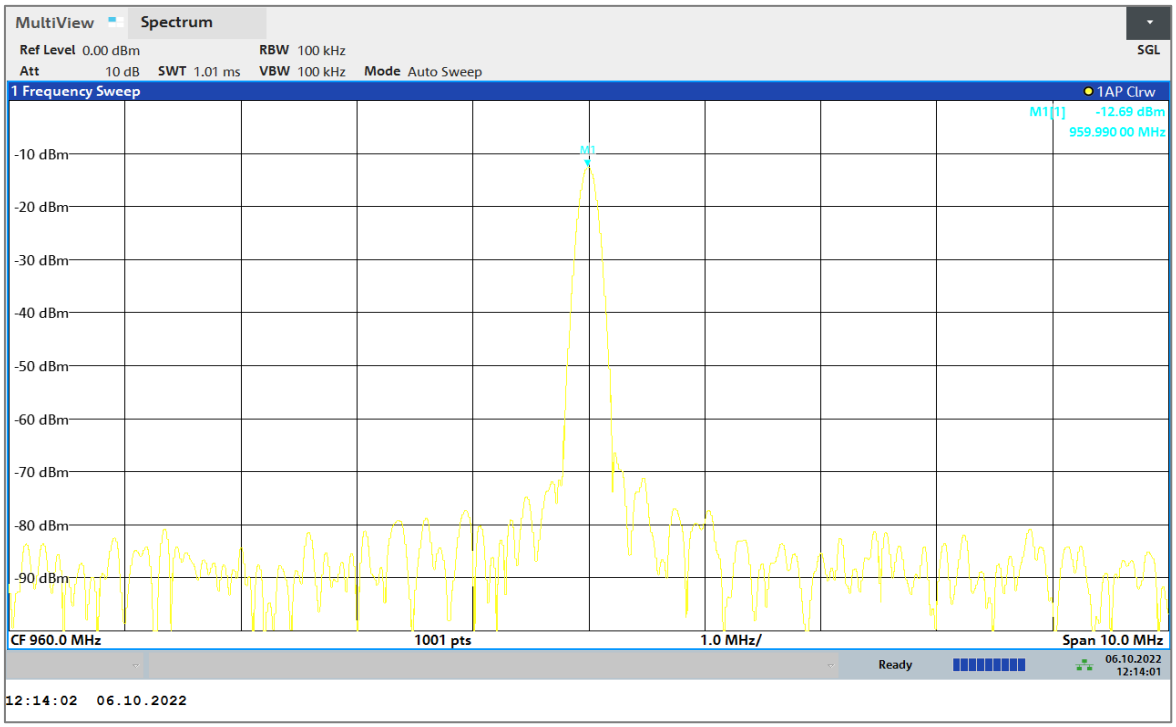
Giriş Frekans (GHz)	Giriş Gücü (dBm)	Çıkış Frekans (MHz)	Çıkış Gücü (dBm)	Kazanç (dB)	Lokal Osilatör (GHz)	Güç Yoğunluğu (dBm / Hz)	Gürültü Figürü (dB)	Giriş Kablo Kaybı (dB)
7	-40	960	-12,54	28,93	7.960	-140,16	4,71	-1,47
8	-40	960	-12,69	28,89	8.960	-140,88	4,03	-1,58
9	-40	960	-16,28	25,37	9.960	-144,2	4,23	-1,65
10	-40	960	-17,48	24,17	10.960	-145,39	4,24	-1,65
11	-40	960	-17,86	23,9	11.960	-145,54	4,36	-1,76
12	-40	960	-20,26	21,58	12.960	-145,66	6,56	-1,84
13	-40	960	-19,85	22,07	13.960	-145,32	6,41	-1,92
14	-40	960	-17,87	24,03	14.960	-145,66	4,11	-1,9



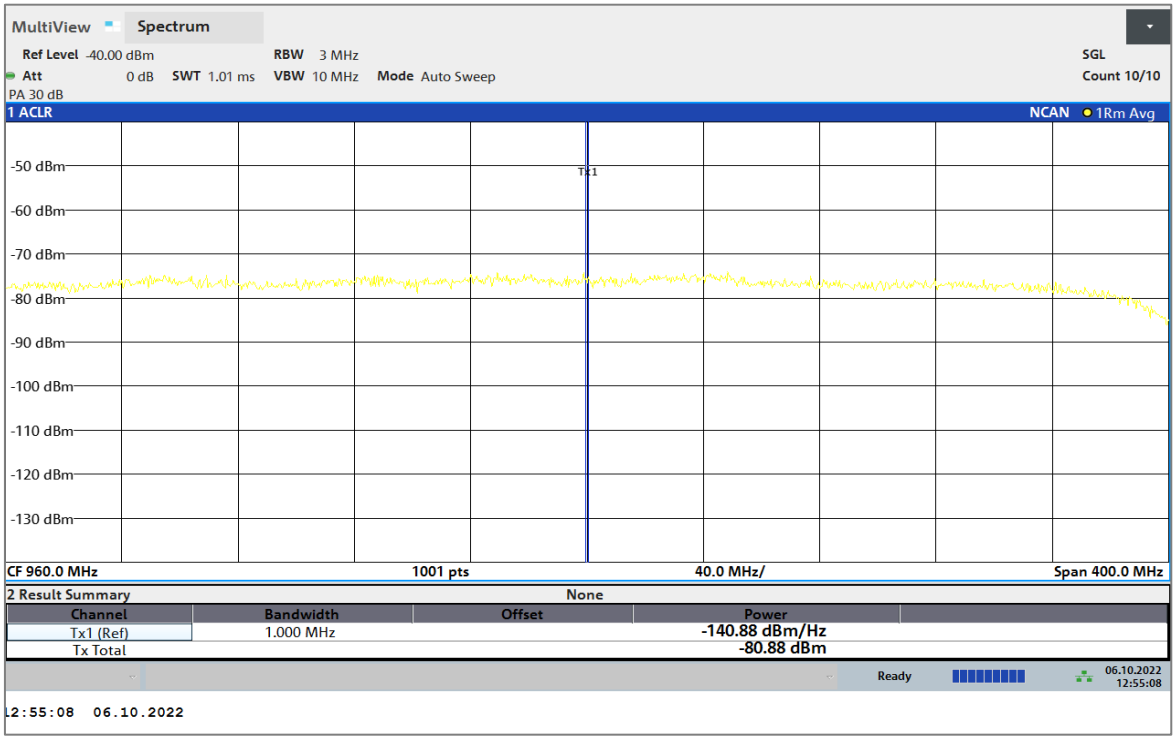
Şekil 5.54. 7 GHz kazanç ölçüm değeri



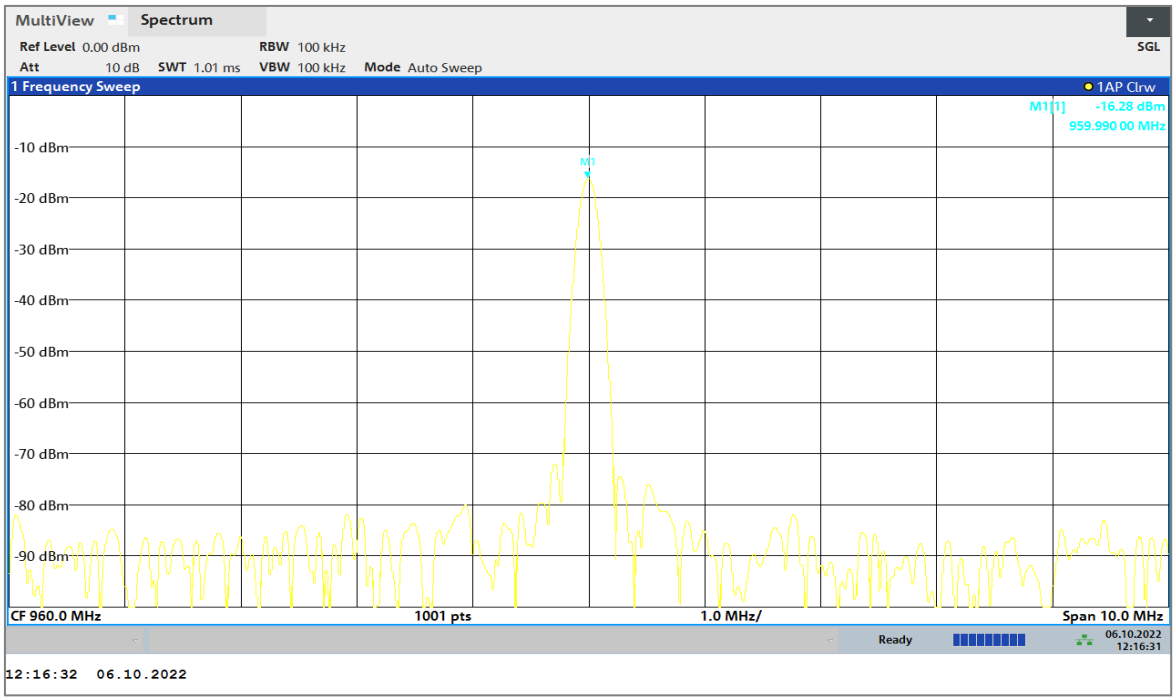
Şekil 5.55. 7 GHz Pcold ölçüm değeri



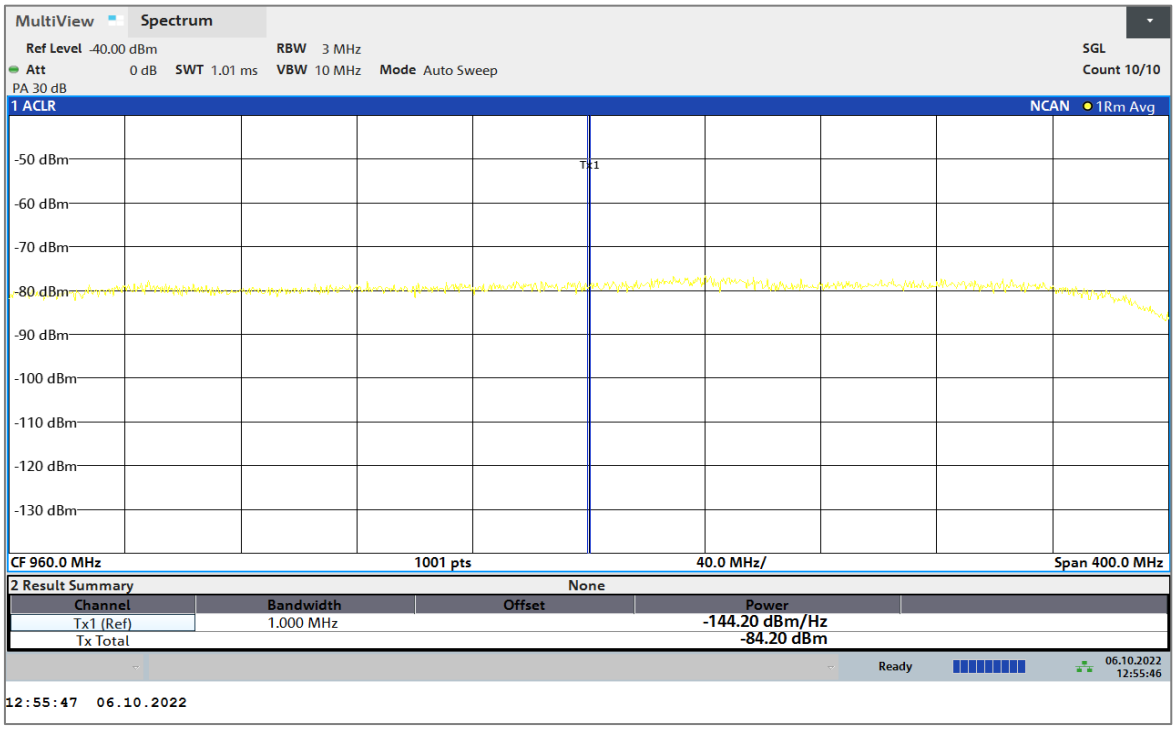
Şekil 5.56. 8 GHz kazanç ölçüm değeri



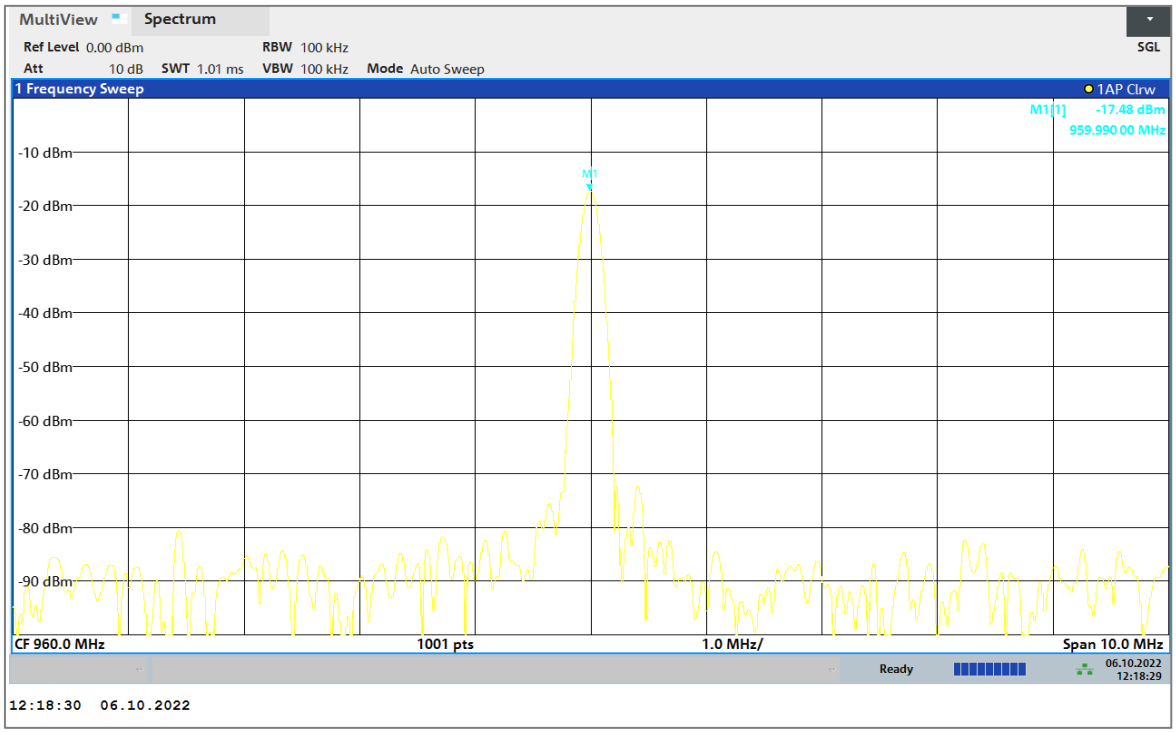
Şekil 5.57. 8 GHz Pcold ölçüm değeri



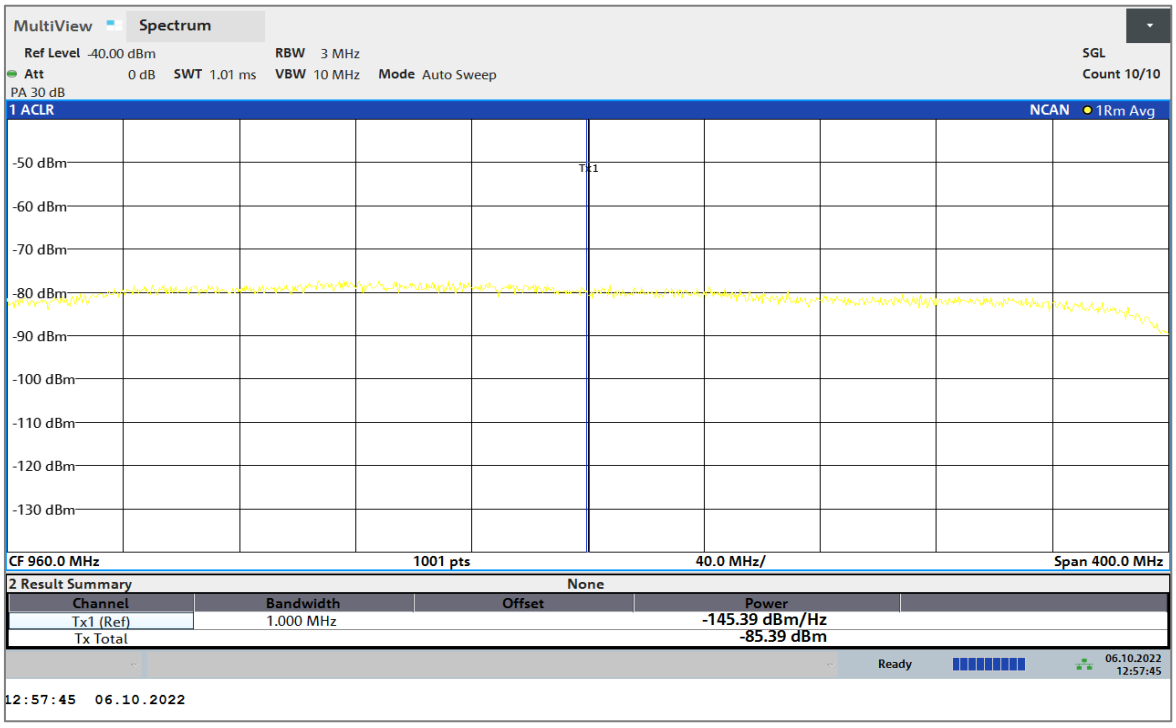
Şekil 5.58. 9 GHz kazanç ölçüm değeri



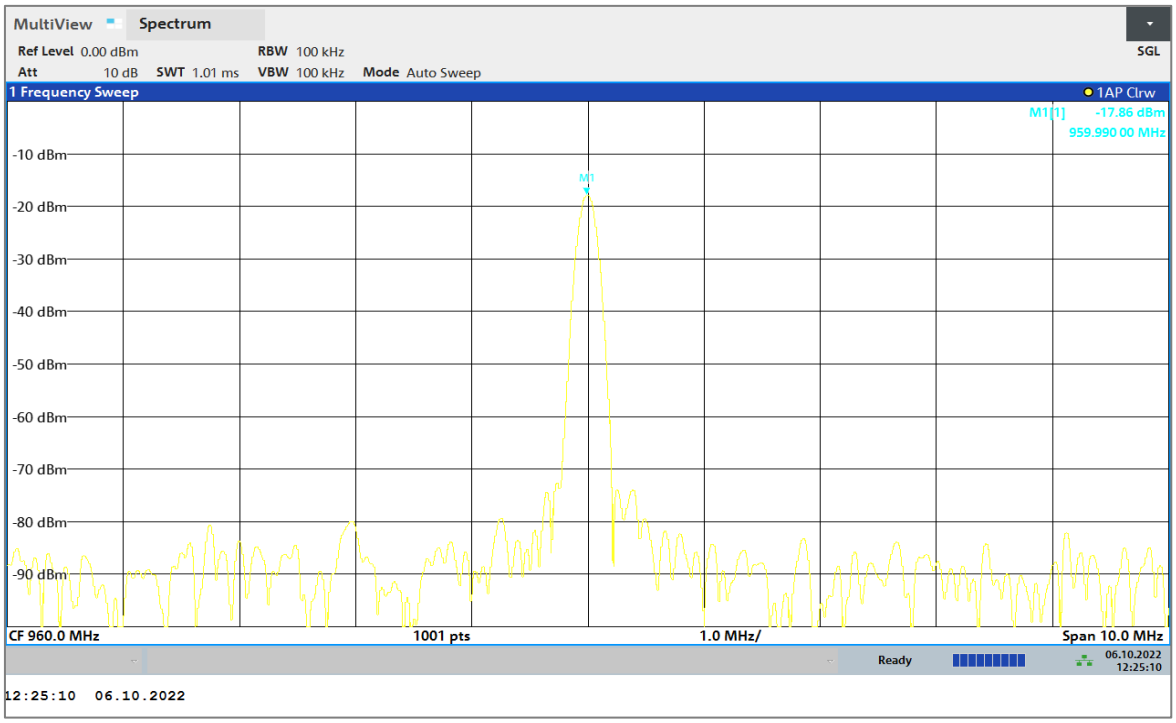
Şekil 5.59. 9 GHz Pcold ölçüm değeri



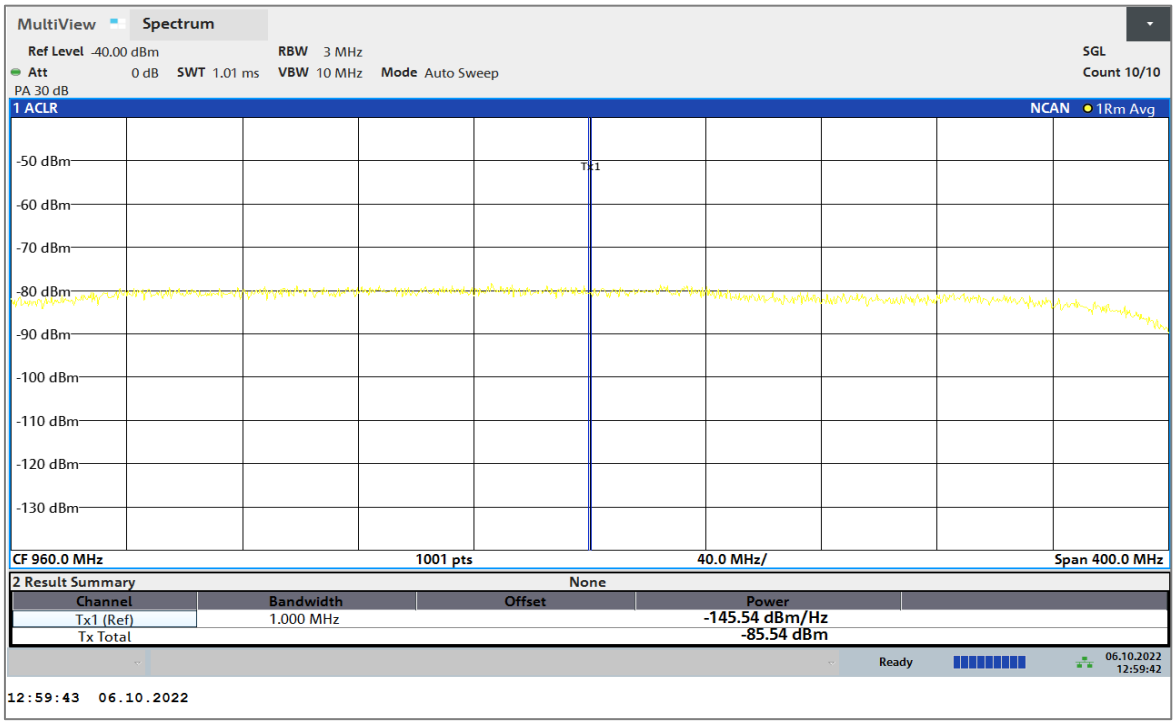
Şekil 5.60. 10 GHz kazanç ölçüm değeri



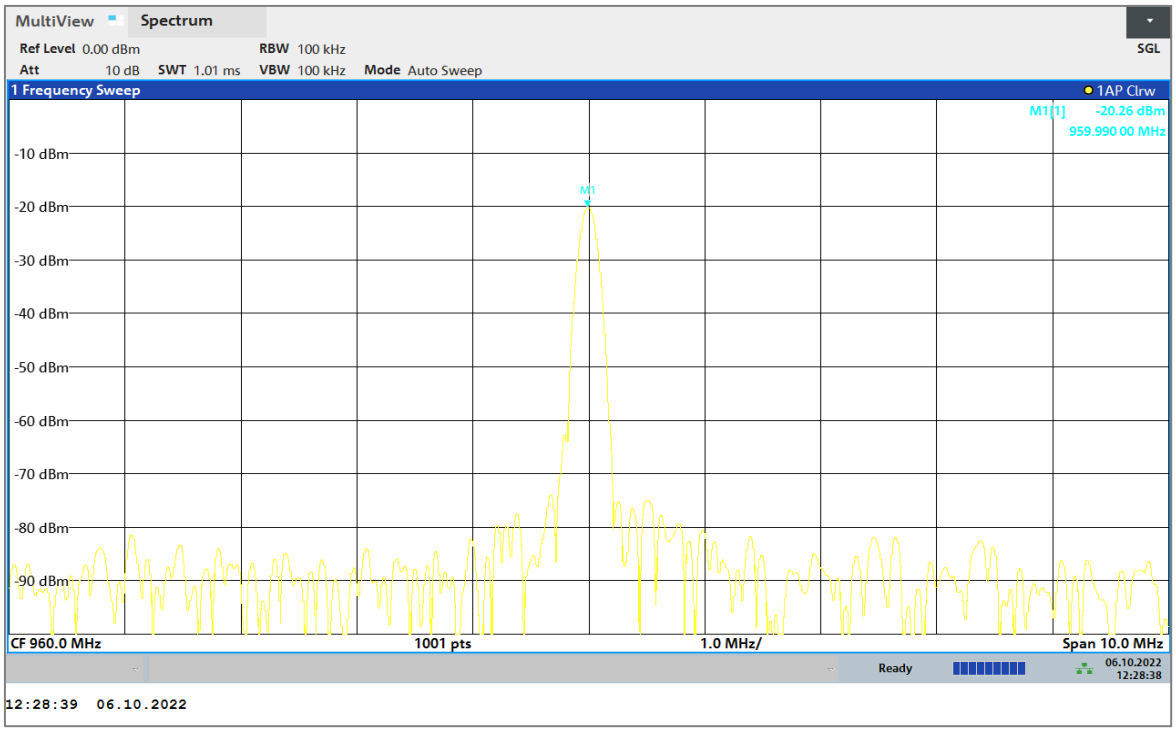
Şekil 5.61. 10 GHz Pcold ölçüm değeri



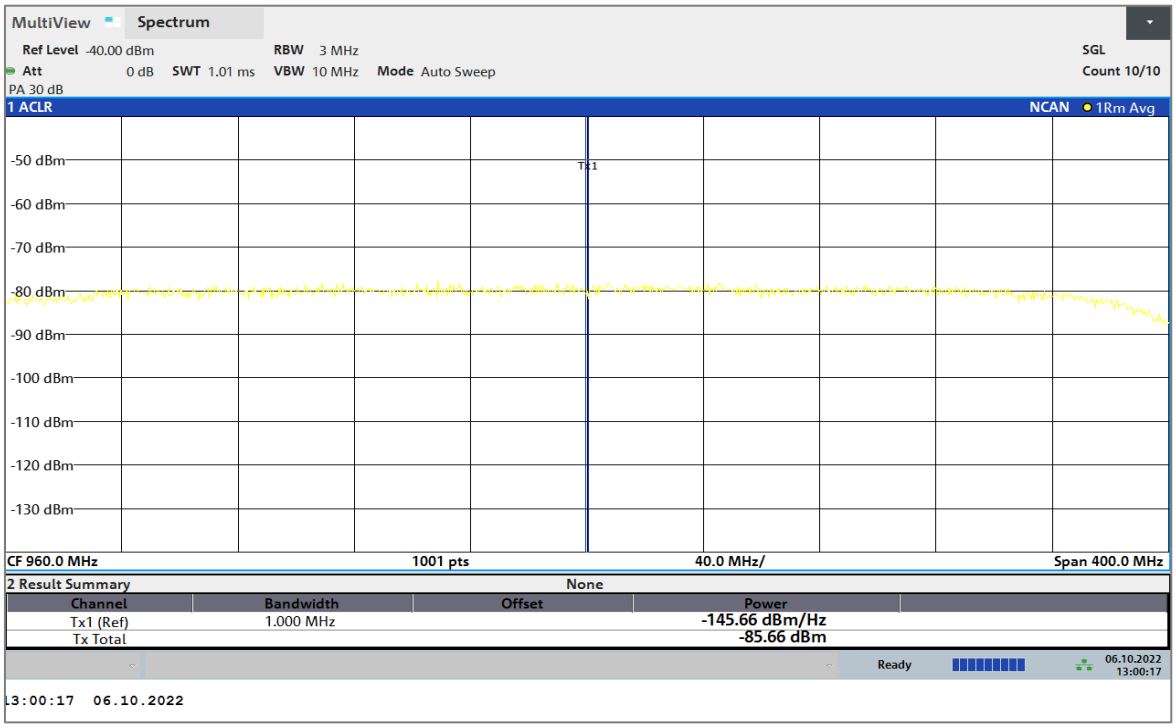
Şekil 5.62. 11 GHz kazanç ölçüm değeri



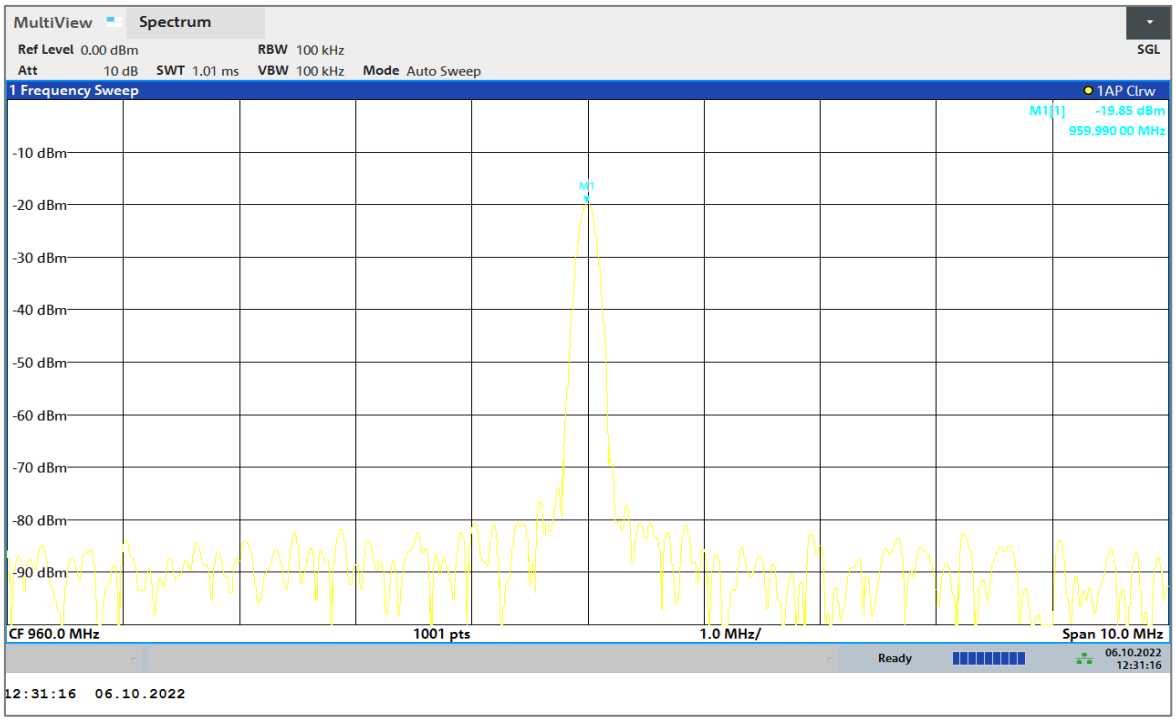
Şekil 5.63. 11 GHz Pcold ölçüm değeri



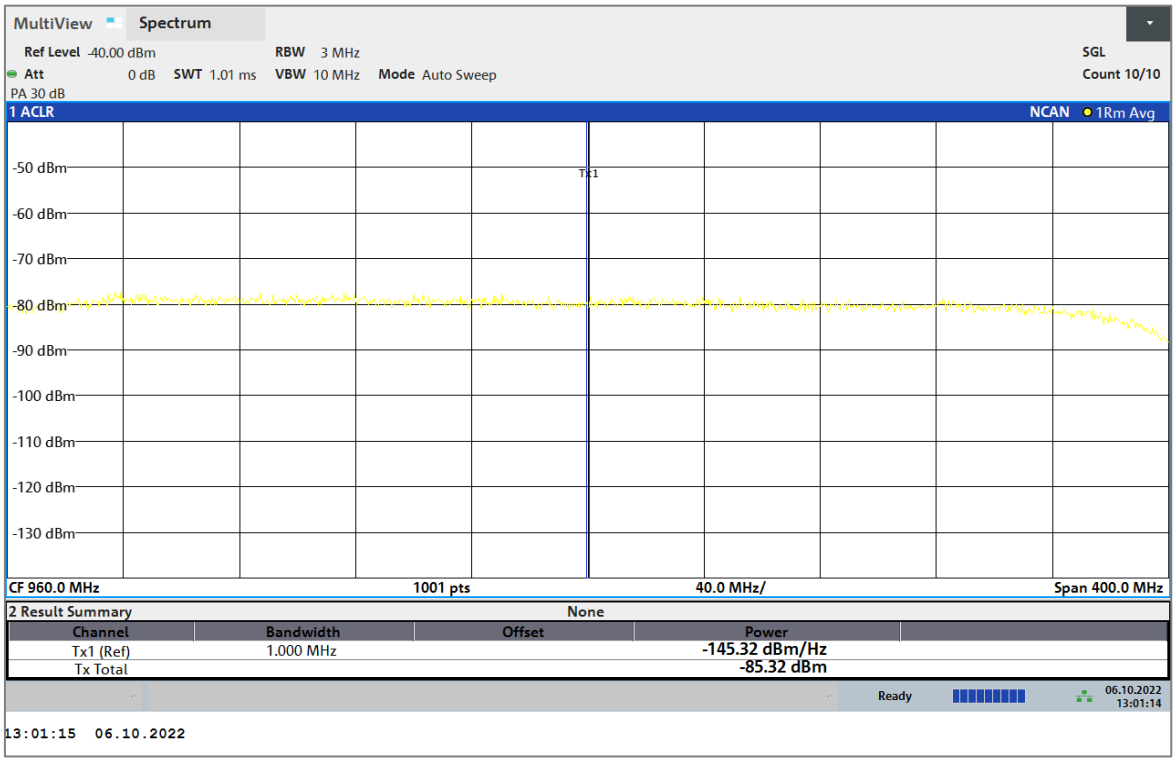
Şekil 5.64. 12 GHz kazanç ölçüm değeri



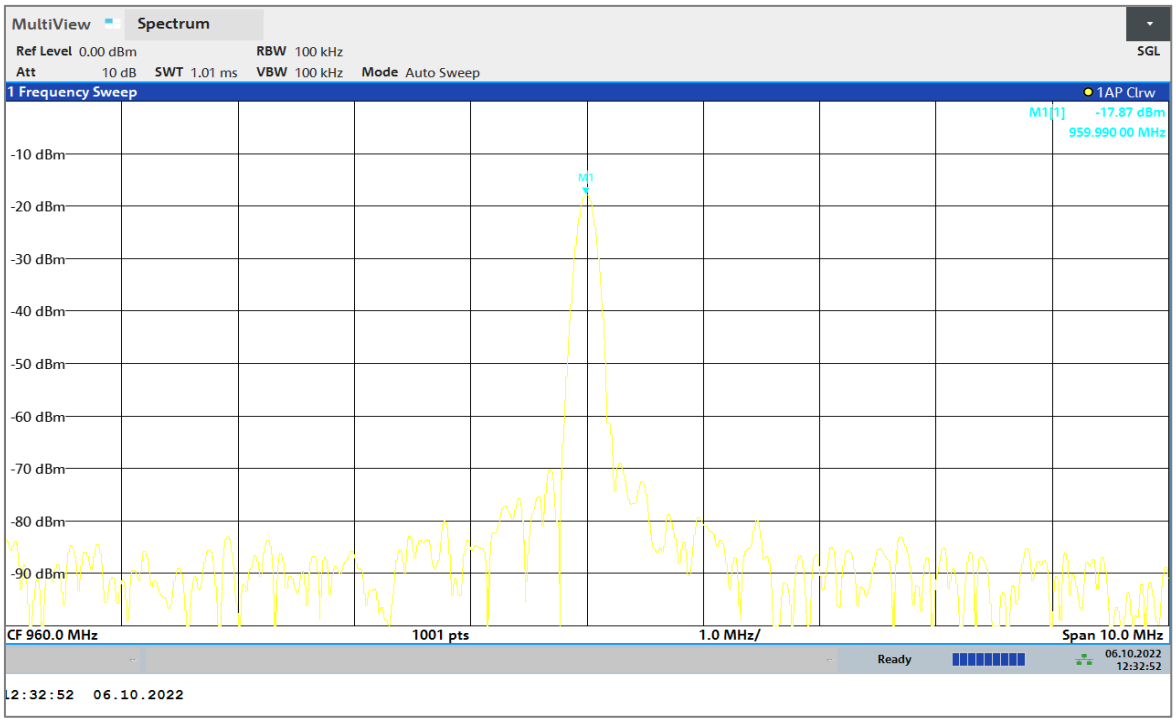
Şekil 5.65. 12 GHz Pcold ölçüm değeri



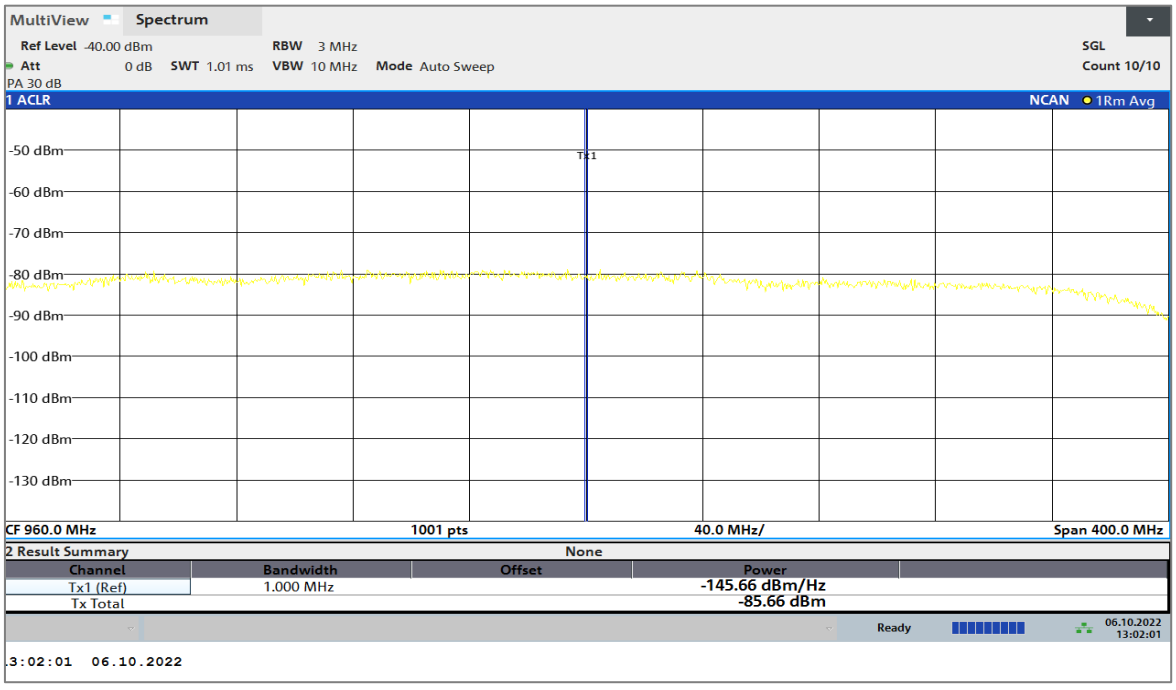
Şekil 5.66. 13 GHz kazanç ölçüm değeri



Şekil 5.67. 13 GHz Pcold ölçüm değeri



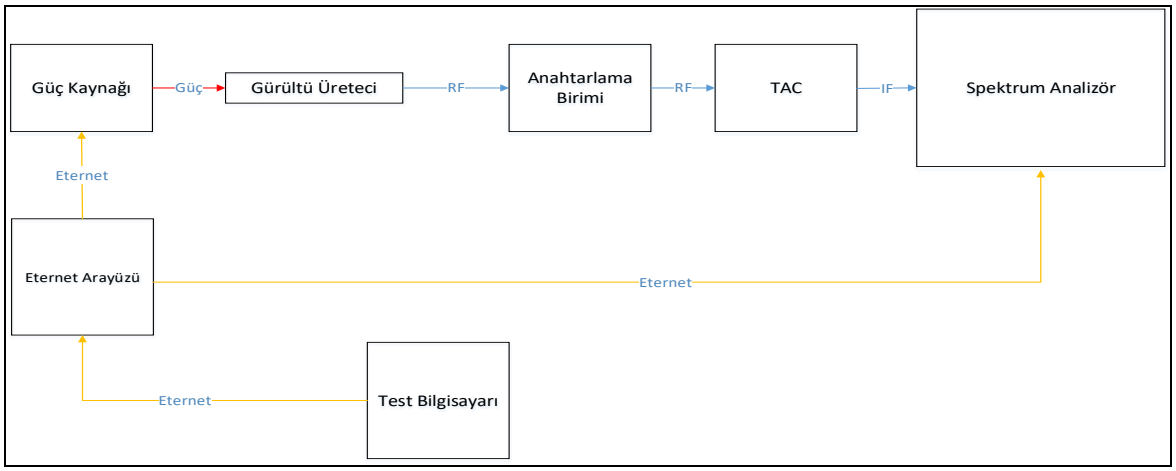
Şekil 5.68. 14 GHz kazanç ölçüm değeri



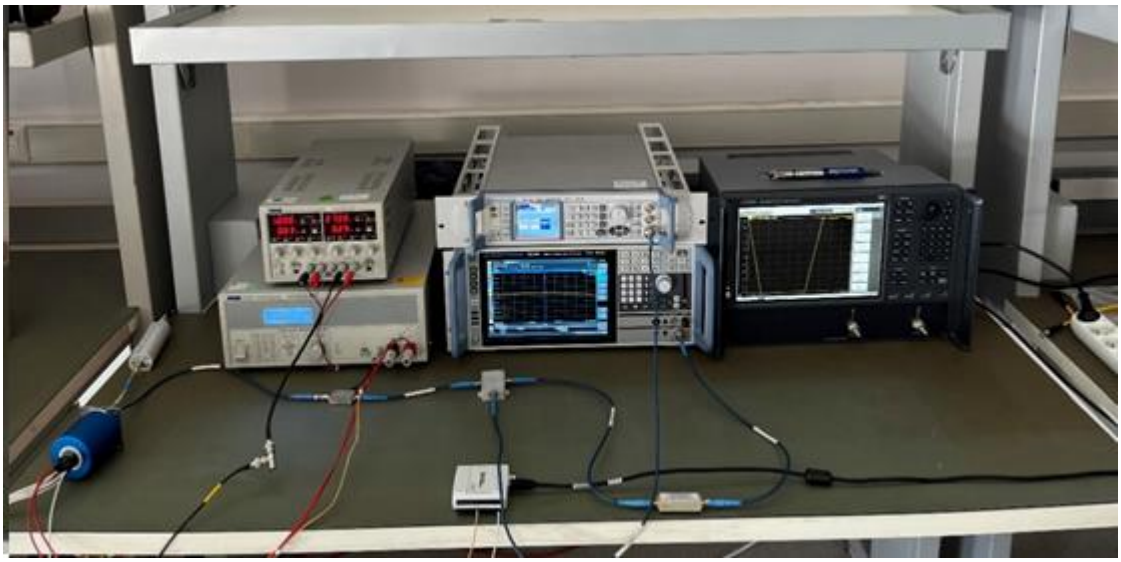
Şekil 5.69. 14 GHz Pcold ölçüm değeri

5.5. Ölçüm 4: Y- Faktör Metodu ile Anahtarlama Birimi Eklenerek

Üç farklı alınan ölçümlerin ardından test düzeneğine anahtarlama matrisi eklendi. Burada amaç çok kanallı RF almaç sistemlerinin testlerinde eklenen anahtarlama biriminin gürültü figürüne etkisini görmektir. Şekil 5.70'te test düzeneği verilmiştir. Anahtarlama birimi eklenerek kurulan test ölçüm düzeneği Şekil 5.71'de verilmiştir. 7-14 GHz frekans aralığında elde edilen, Phot ve Pcold ölçüm değerleri Şekil 5.72 ile Şekil 5.87 arasında görülmektedir. Çizelge 5.6'da ölçüm sonuçları verilmiştir.



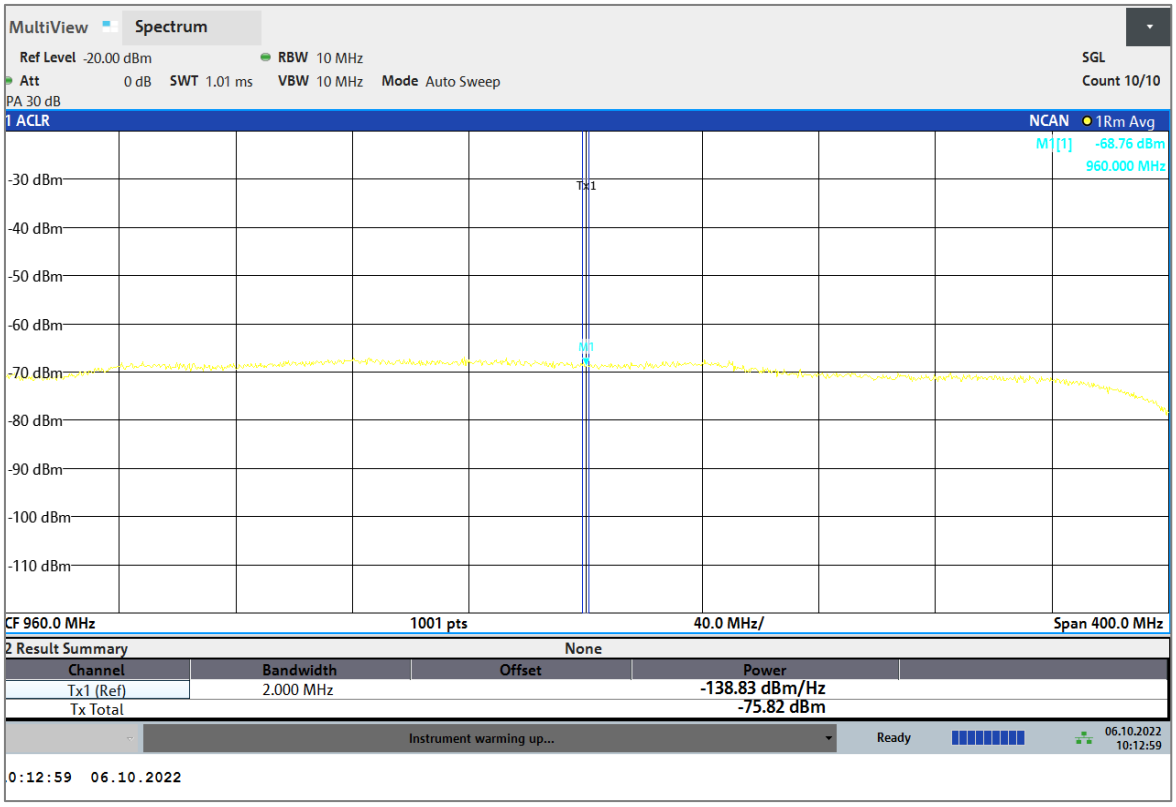
Şekil 5.70. Anahtarlama matrisi ile kurulacak test ölçüm düzeneği



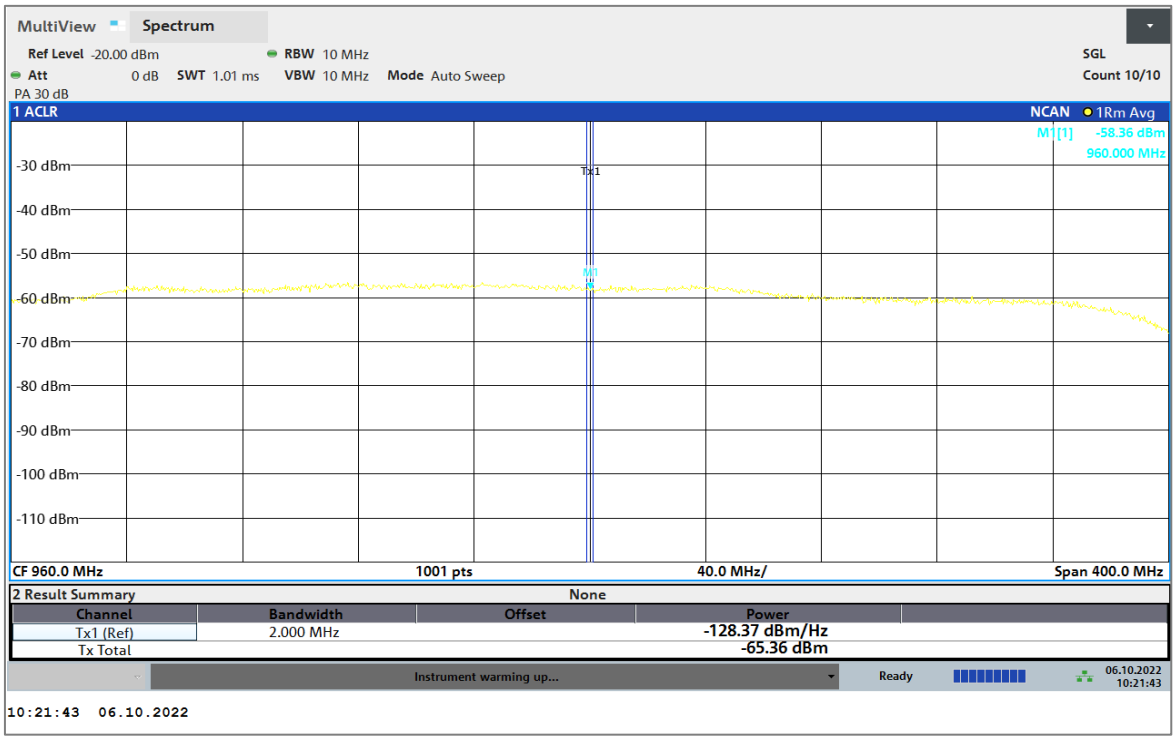
Şekil 5.71. Anahtarlama birimi eklenerek kurulan test ölçüm düzeneği

Çizelge 5.6. Test düzeneğine anahtarlama birimi eklenerek alınan ölçümler

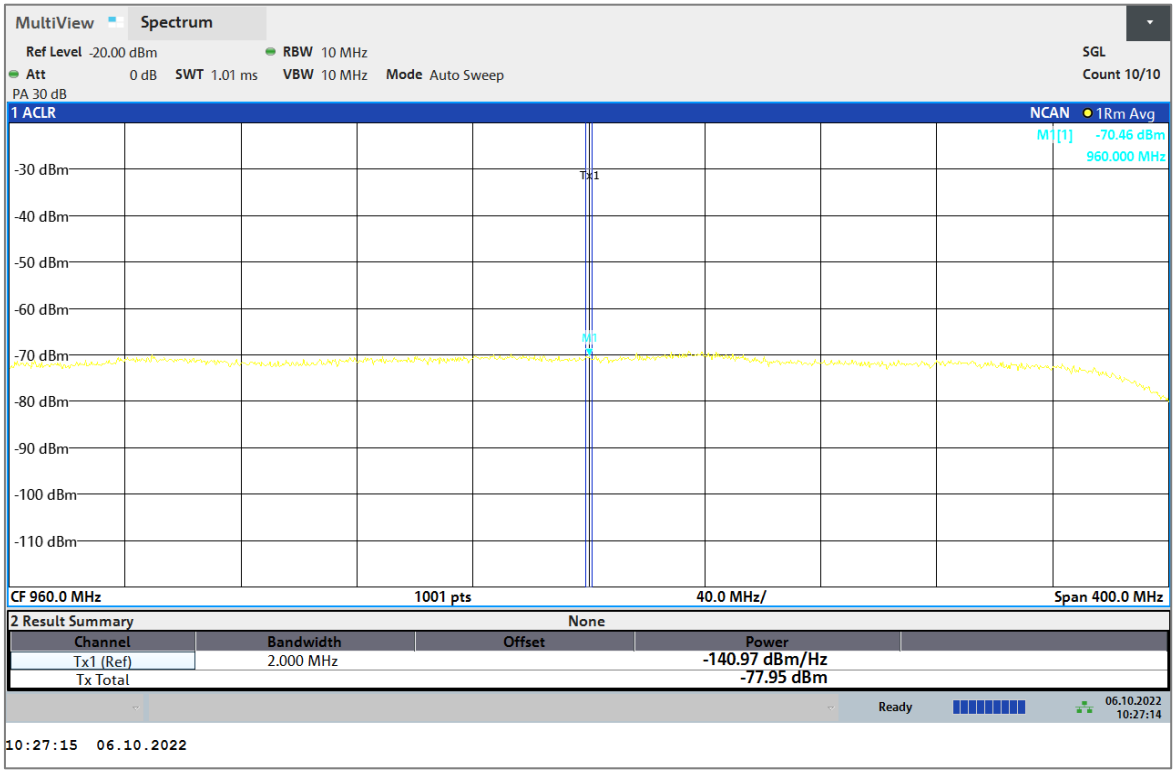
Giriş Frekans (GHz)	AGO (dB)	Çıkış Frekans (MHz)	Lokal Osilatör (GHz)	Phot (dBm / Hz)	Pcold (dBm / Hz)	Gürültü Figürü (dB)	Anahtarlama Birmi Kaybı (dB)
7	14,35	960	7.960	-128,37	-138,83	2,8	-1,09
8	14,3	960	8.960	-130,5	-140,97	2,65	-1,18
9	14,26	960	9.960	-133,26	-143,68	2,67	-1,17
10	14,32	960	10.960	-133,96	-144,36	2,65	-1,27
11	14,35	960	11.960	-134,38	-144,79	2,67	-1,27
12	14,38	960	12.960	-133,56	-144,13	2,49	-1,32
13	14,37	960	13.960	-133,59	-144,22	2,4	-1,34
14	14,48	960	14.960	-134,24	-144,81	2,41	-1,5



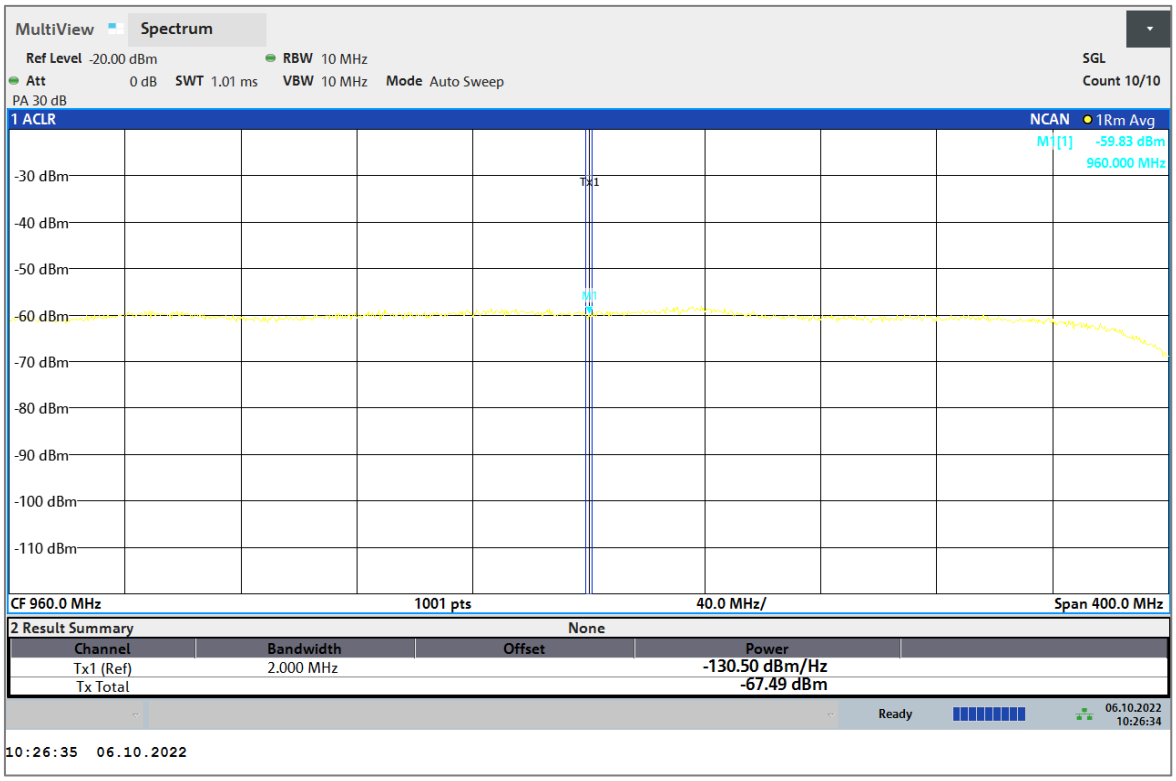
Şekil 5.72. 7 GHz Pcold ölçüm değeri



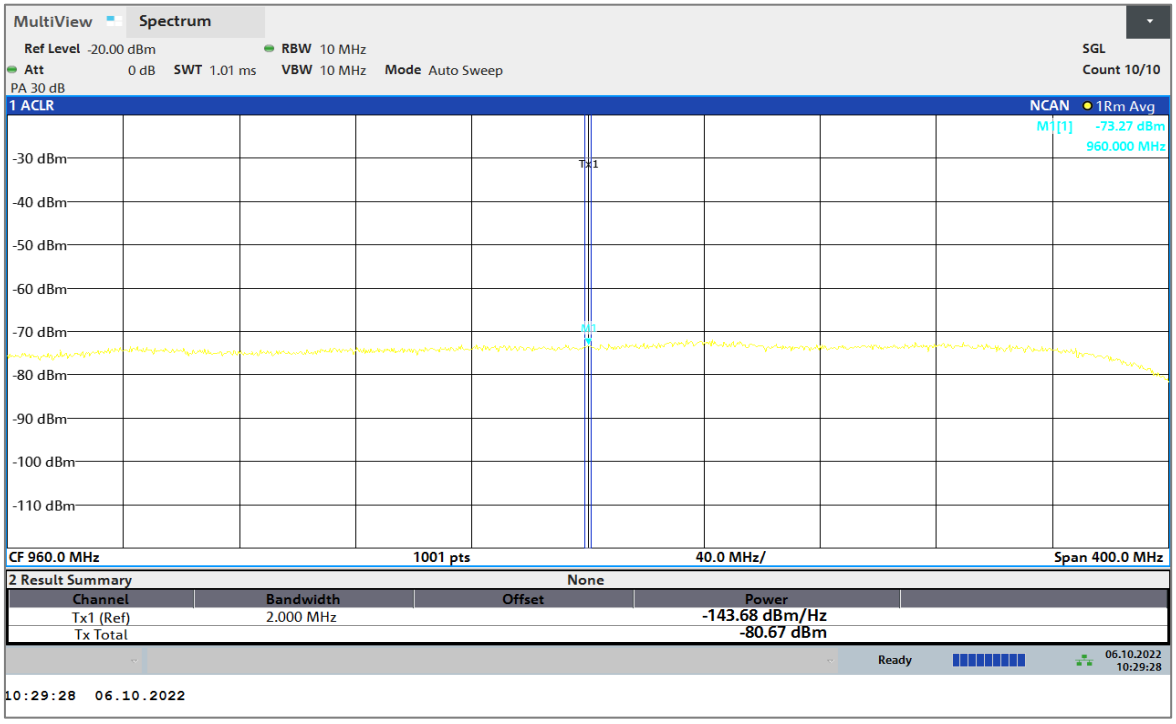
Şekil 5.73. 7 GHz Phot ölçüm değeri



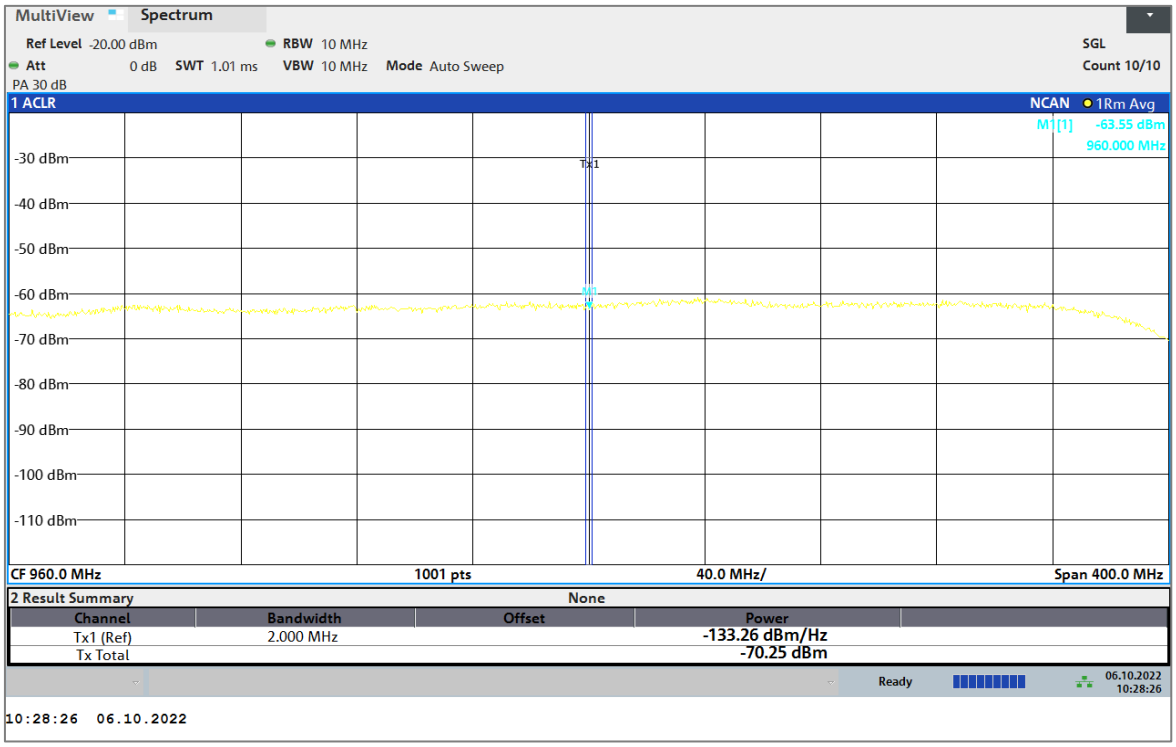
Şekil 5.74. 8 GHz Pcold ölçüm değeri



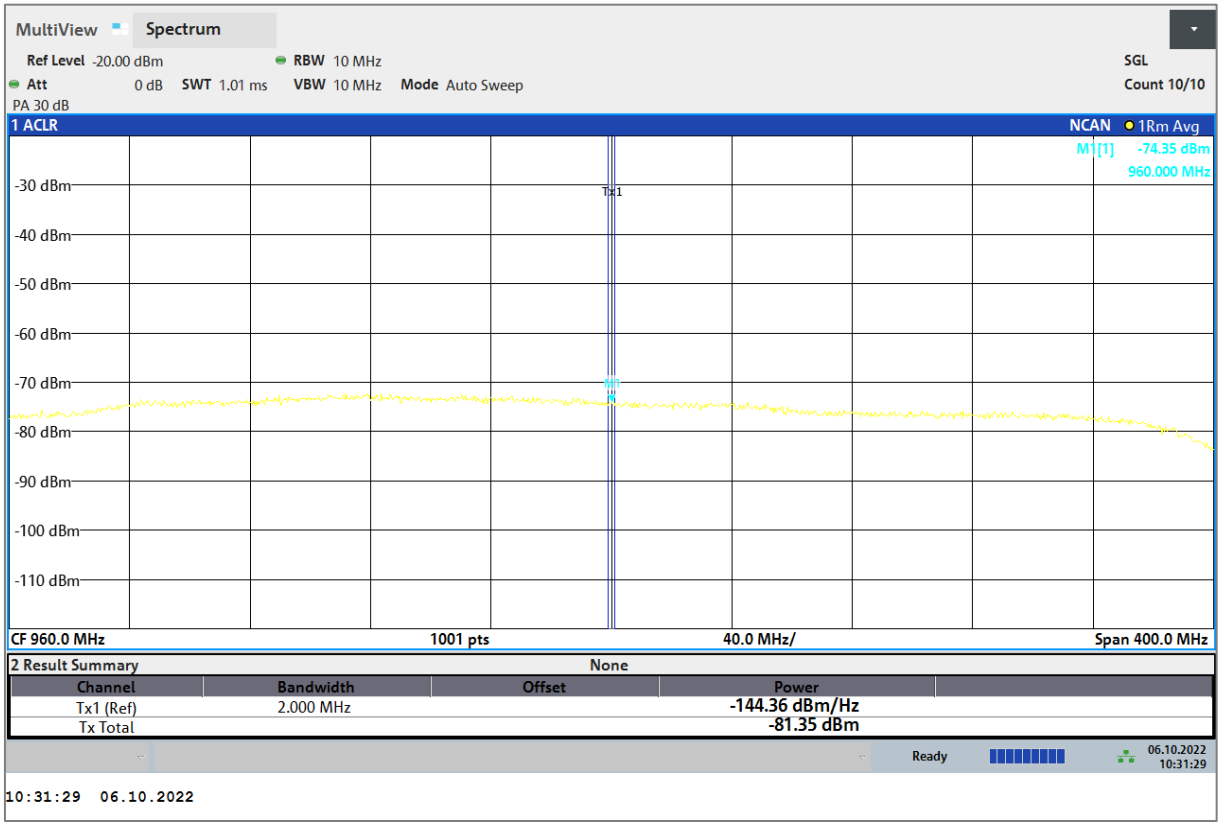
Şekil 5.75. 8 GHz Phot ölçüm değeri



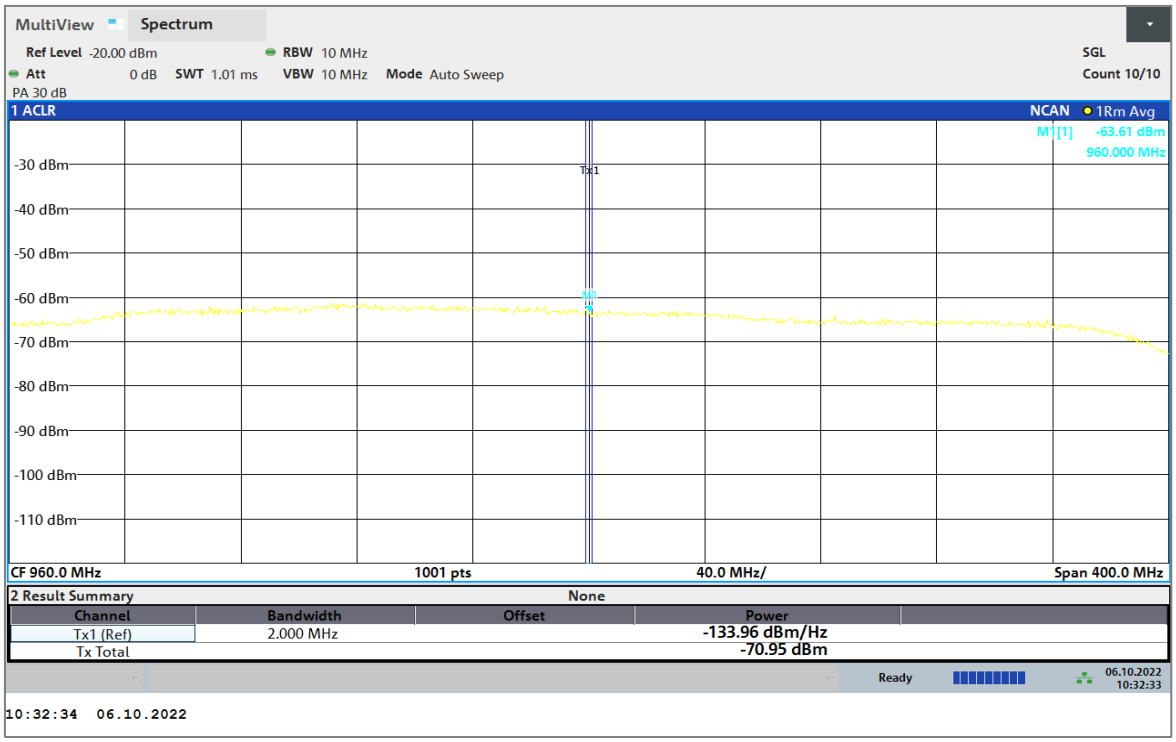
Şekil 5.76. 9 GHz Pcold ölçüm değeri



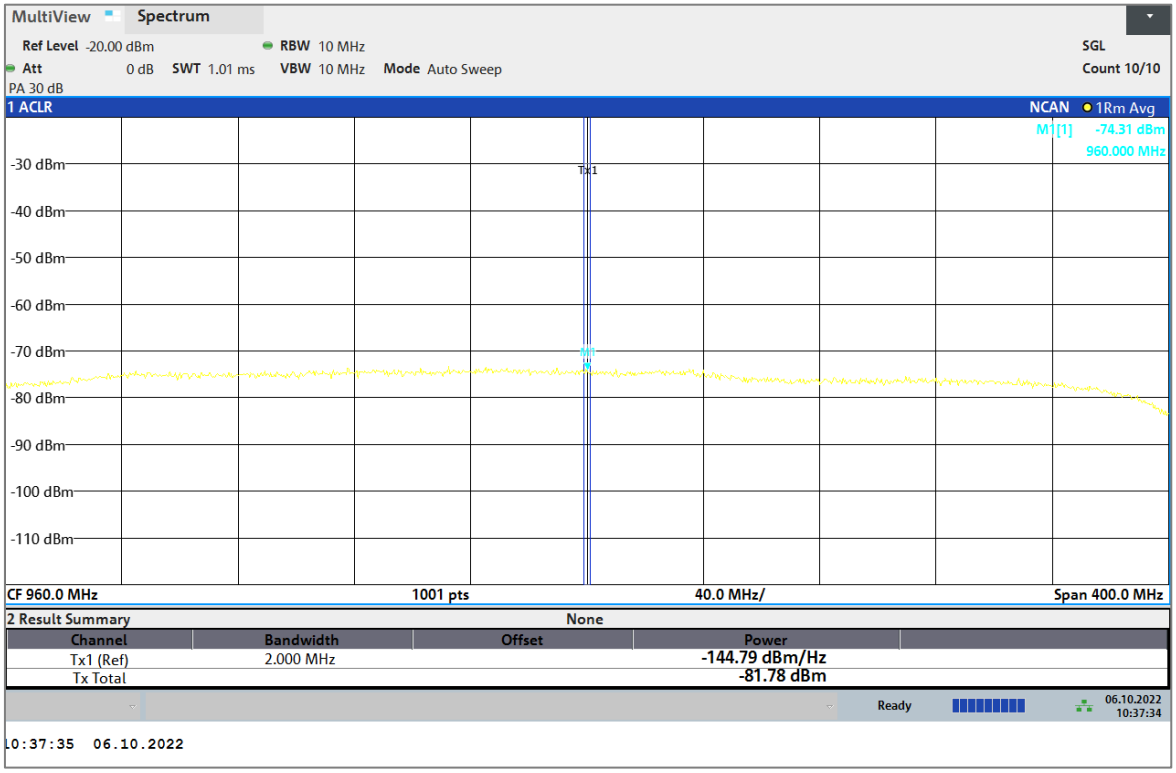
Şekil 5.77. 9 GHz Phot ölçüm değeri



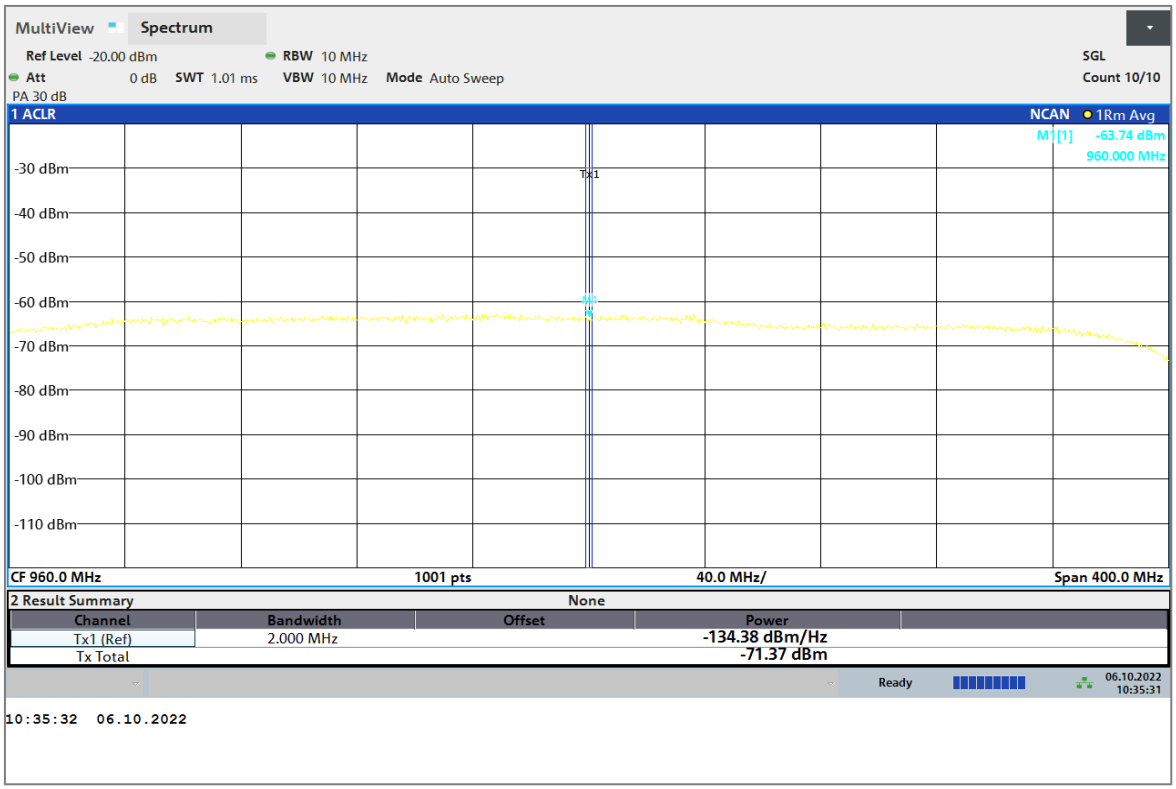
Şekil 5.78. 10 GHz Pcold ölçüm değeri



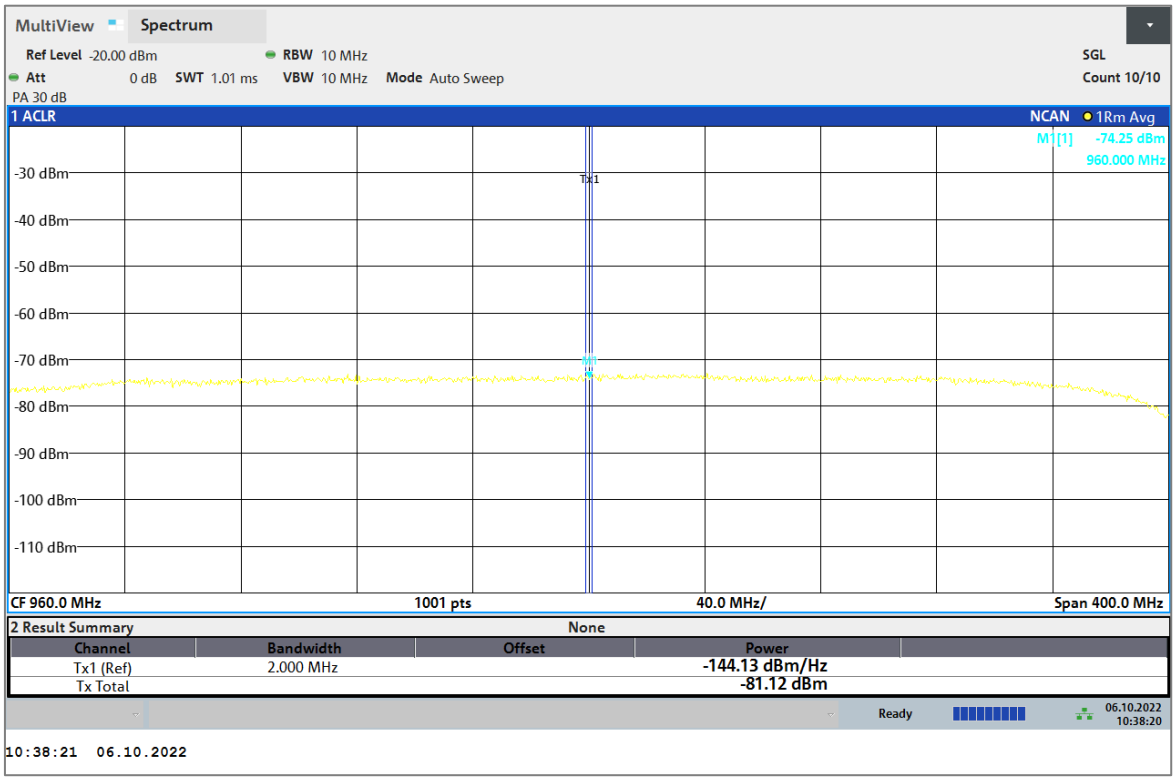
Şekil 5.79. 10 GHz Phot ölçüm değeri



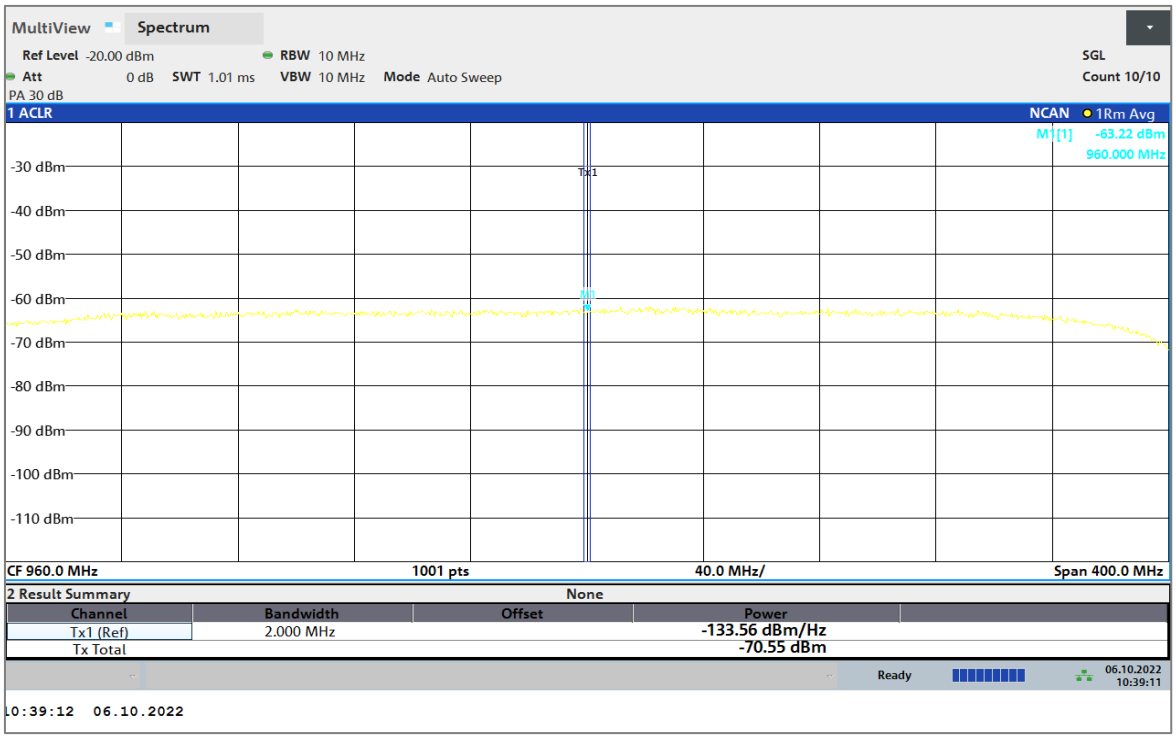
Şekil 5.80. 11 GHz Pcold ölçüm değeri



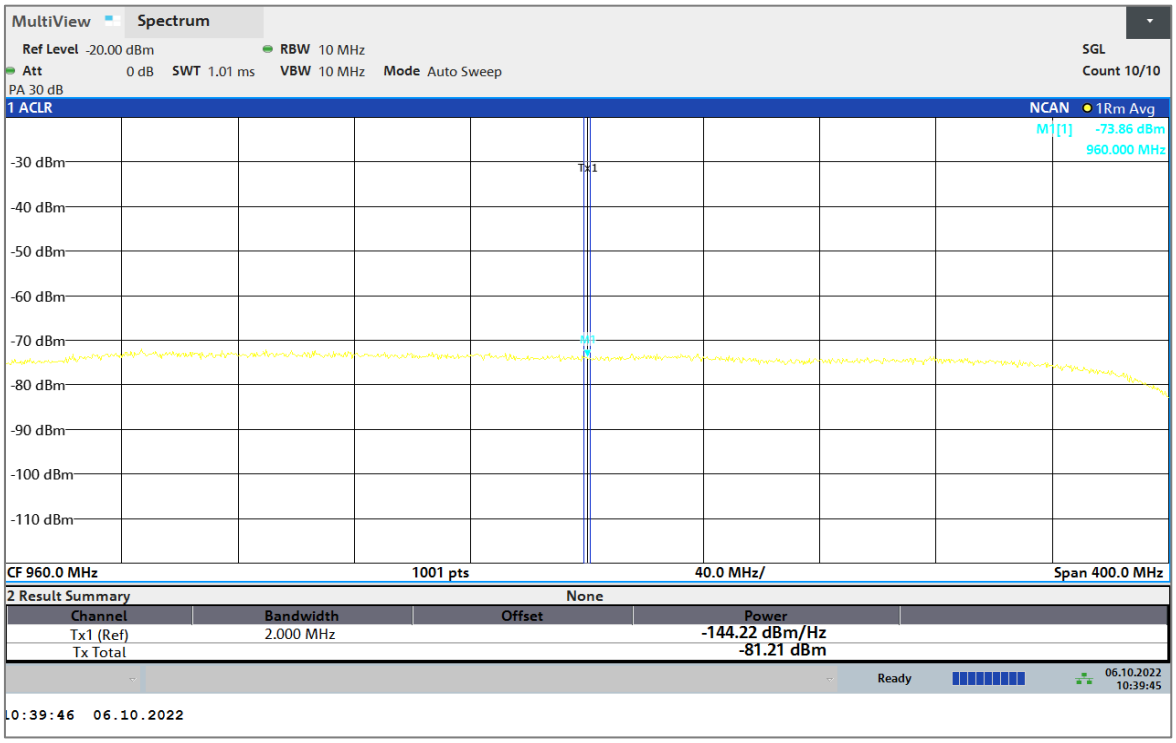
Şekil 5.81. 11 GHz Phot ölçüm değeri



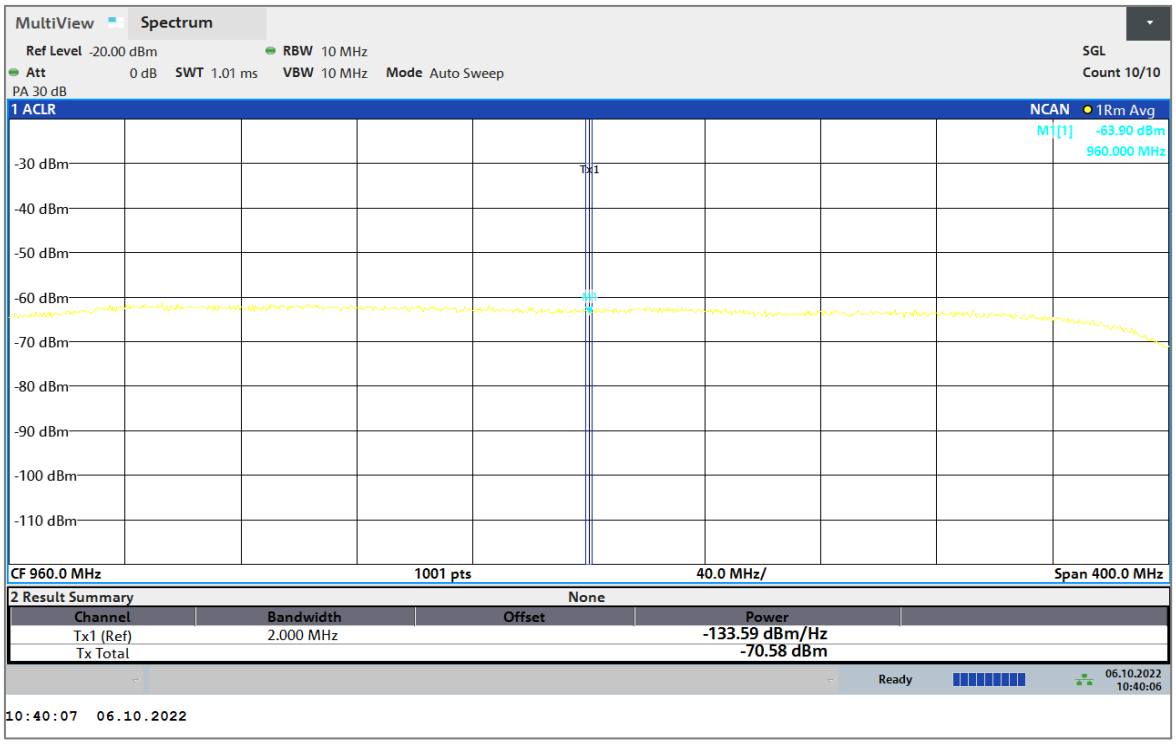
Şekil 5.82. 12 GHz Pcold ölçüm değeri



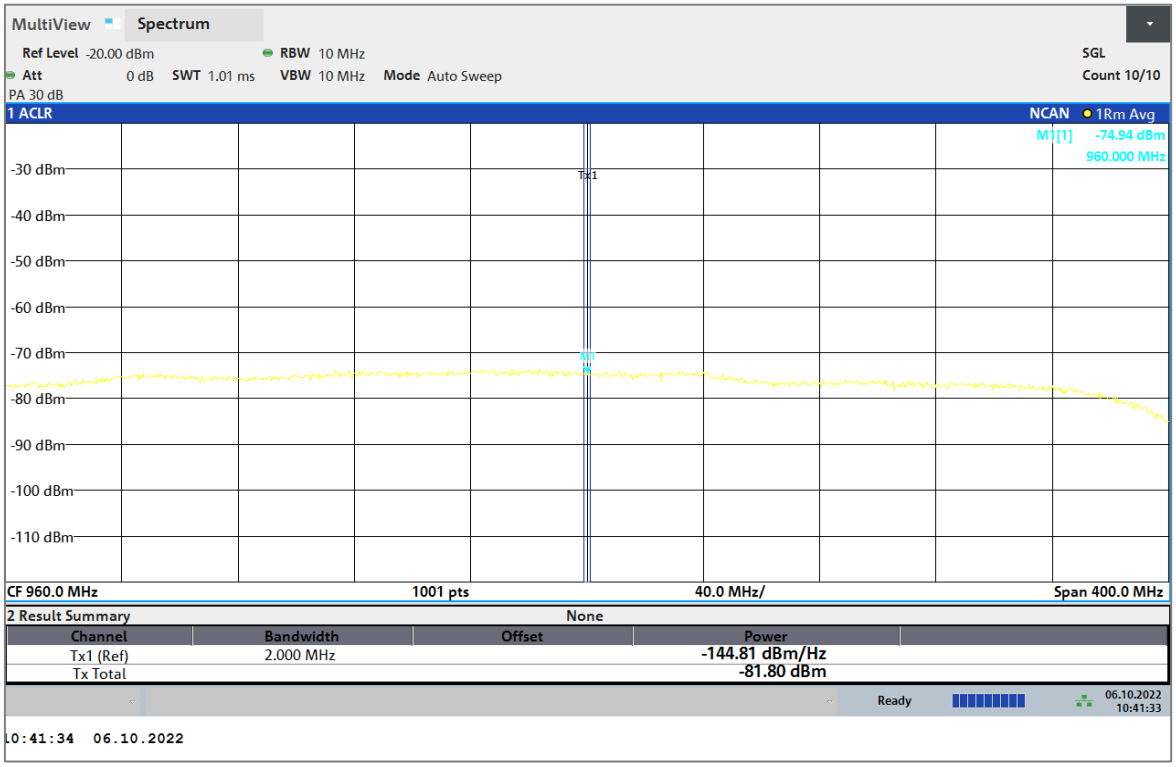
Şekil 5.83. 12 GHz Phot ölçüm değeri



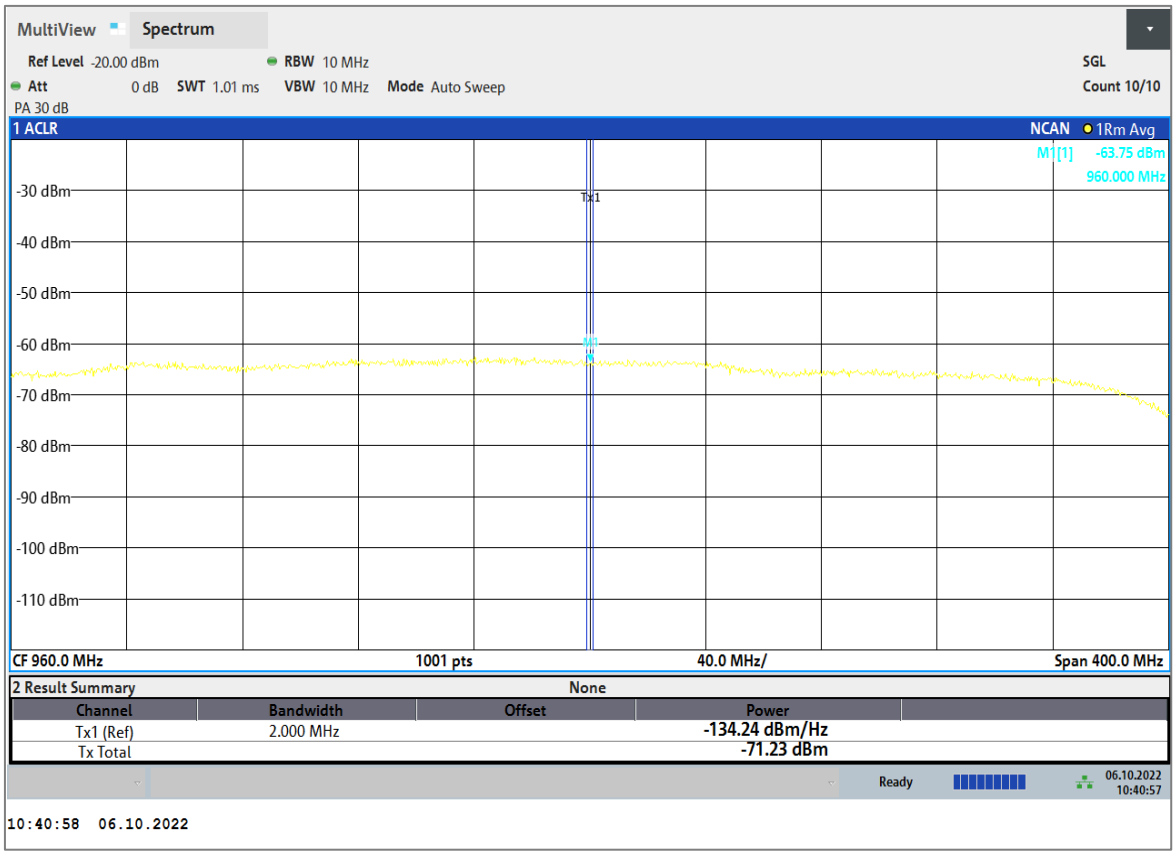
Şekil 5.84. 13 GHz Pcold ölçüm değeri



Şekil 5.85. 13 GHz Phot ölçüm değeri



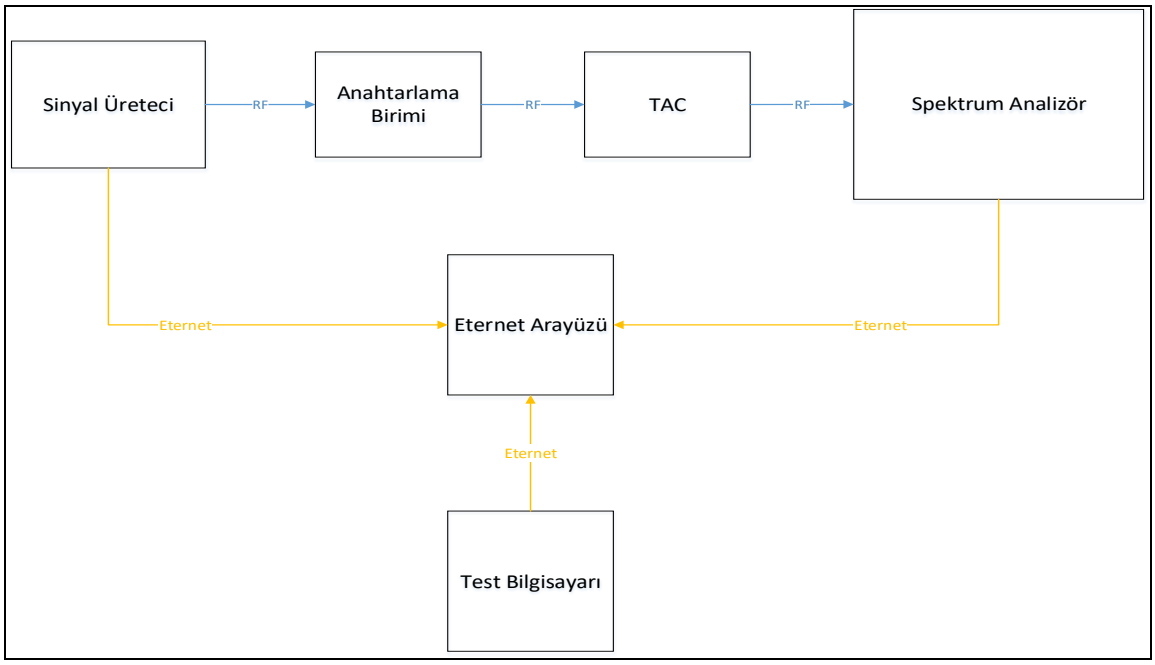
Şekil 5.86. 14 GHz Pcold ölçüm değeri



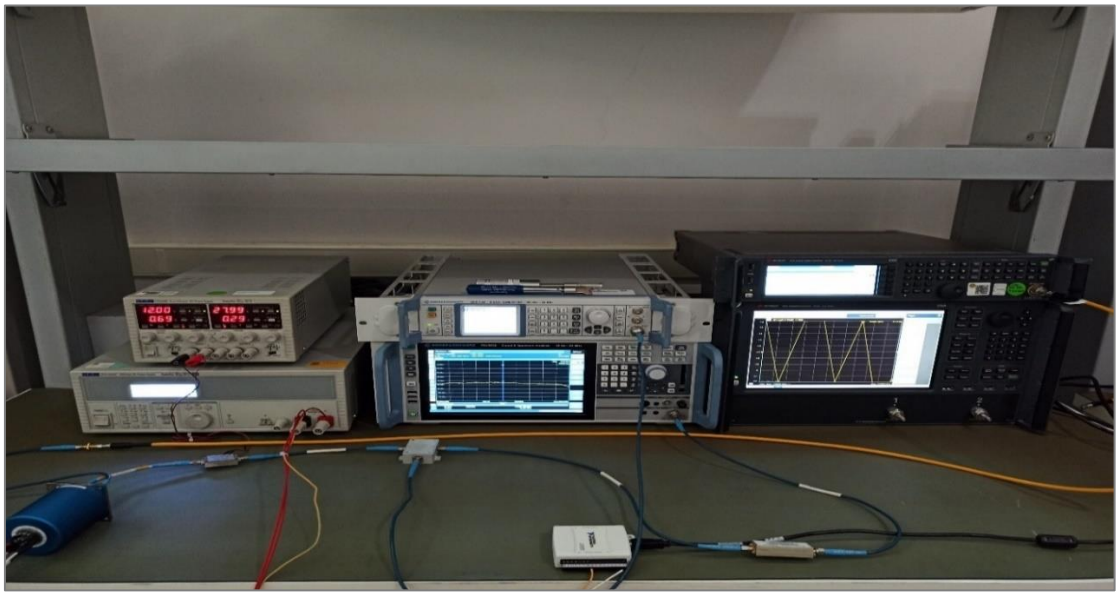
Şekil 5.87. 14 GHz Phot ölçüm değeri

5.6. Ölçüm 4: Kazanç Metodu ile Anahtarlama Birimi Eklenerek

Bölüm 5.5'te eklenen anahtarlama matrisi aynı zamanda kazanç metodu ölçmek için kurulan test düzeneğine de eklenmiş ve anahtarlama biriminin gürültü figürüne etkisi incelenmiştir. İlgili test düzeneği Şekil 5.88'de şematiği verilen anahtarlama birimi ile kurulan test düzeneği Şekil 5.89'da verilmiştir. Çizelge 5.7'de gürültü figürü ölçüm sonuçları verilmiştir. 7-14 GHz frekans aralığında elde edilen kazanç ve Pcold ölçüm değerleri Şekil 5.90 ile Şekil 5.105 arasında görülmektedir.



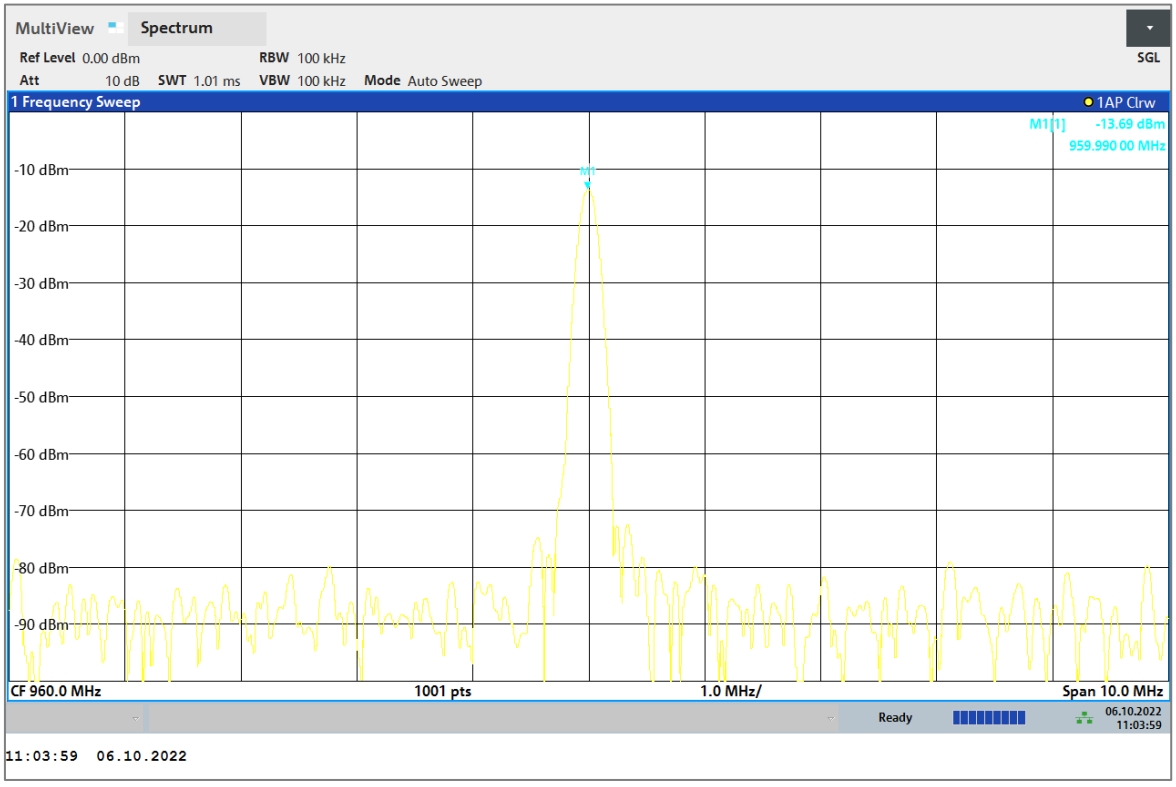
Şekil 5.88. Anahtarlama matrisi ile kurulacak test düzeneği



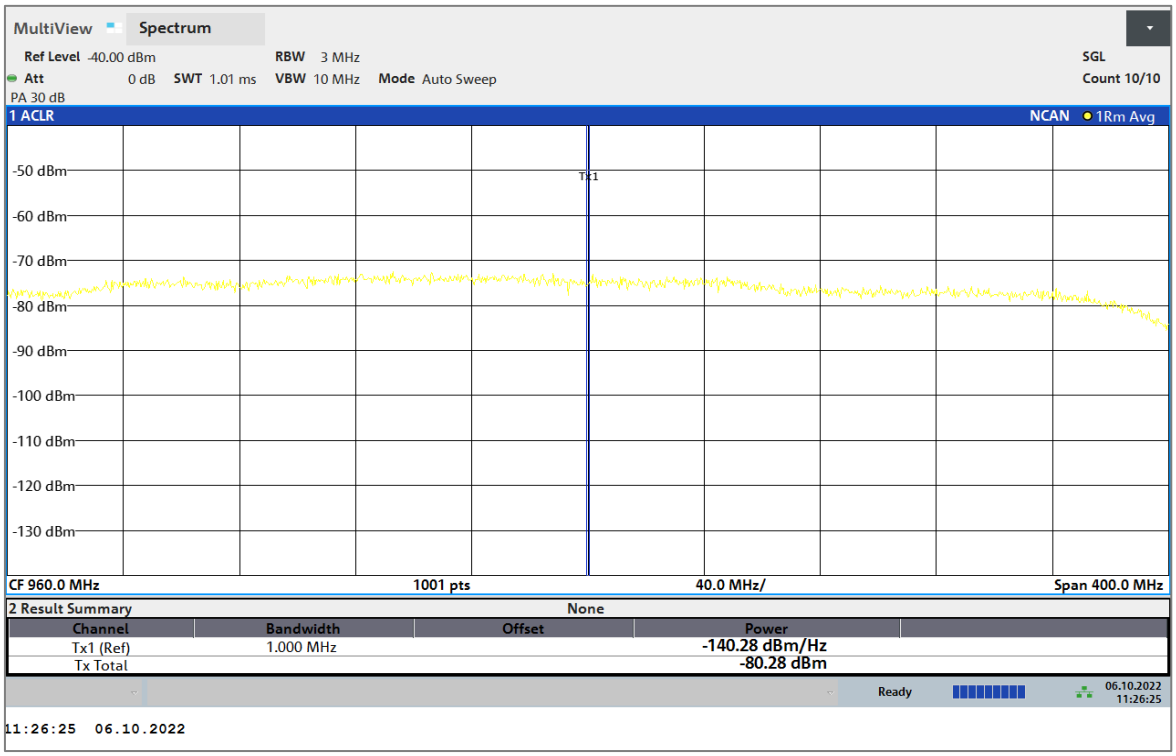
Şekil 5.89. Anahtarlama birimi ile kurulan test düzeneği

Çizelge 5.7. Test düzeneğine anahtarlama birimi eklenerek alınan ölçümler

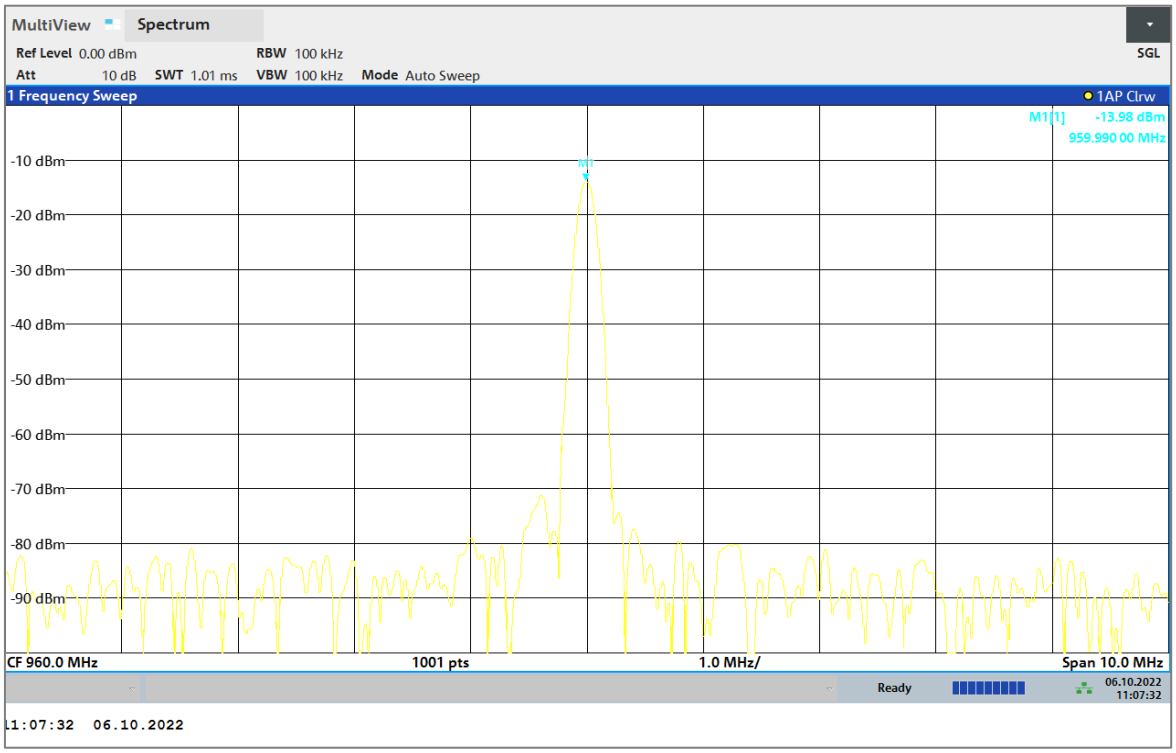
Giriş Frekans (GHz)	Giriş Gücü (dBm)	Çıkış Frekans (MHz)	Çıkış Gücü (dBm)	Kazanç (dB)	Lokal Osilatör (GHz)	Güç Yoğunluğu (dBm / Hz)	Giriş Kablo Kaybı (dB)	Anahtarlama Birimi Kaybı (dB)
7	-40	960	-12,54	28,93	7.960	-140,16	-1,47	-1,09
8	-40	960	-12,69	28,89	8.960	-140,88	-1,58	-1,18
9	-40	960	-16,28	25,37	9.960	-144,2	-1,65	-1,17
10	-40	960	-17,48	24,17	10.960	-145,39	-1,65	-1,27
11	-40	960	-17,86	23,9	11.960	-145,54	-1,76	-1,27
12	-40	960	-20,26	21,58	12.960	-145,66	-1,84	-1,32
13	-40	960	-19,85	22,07	13.960	-145,32	-1,92	-1,34
14	-40	960	-17,87	24,03	14.960	-145,66	-1,9	-1,5



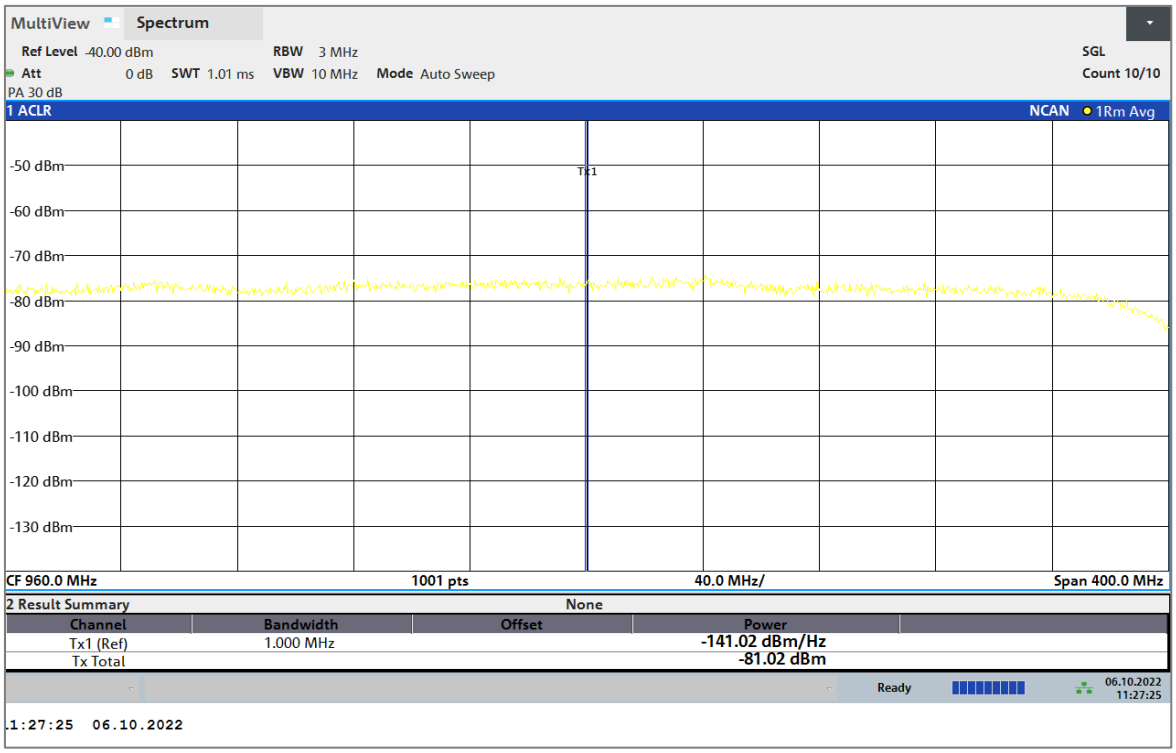
Şekil 5.90. 7 GHz kazanç ölçüm değeri



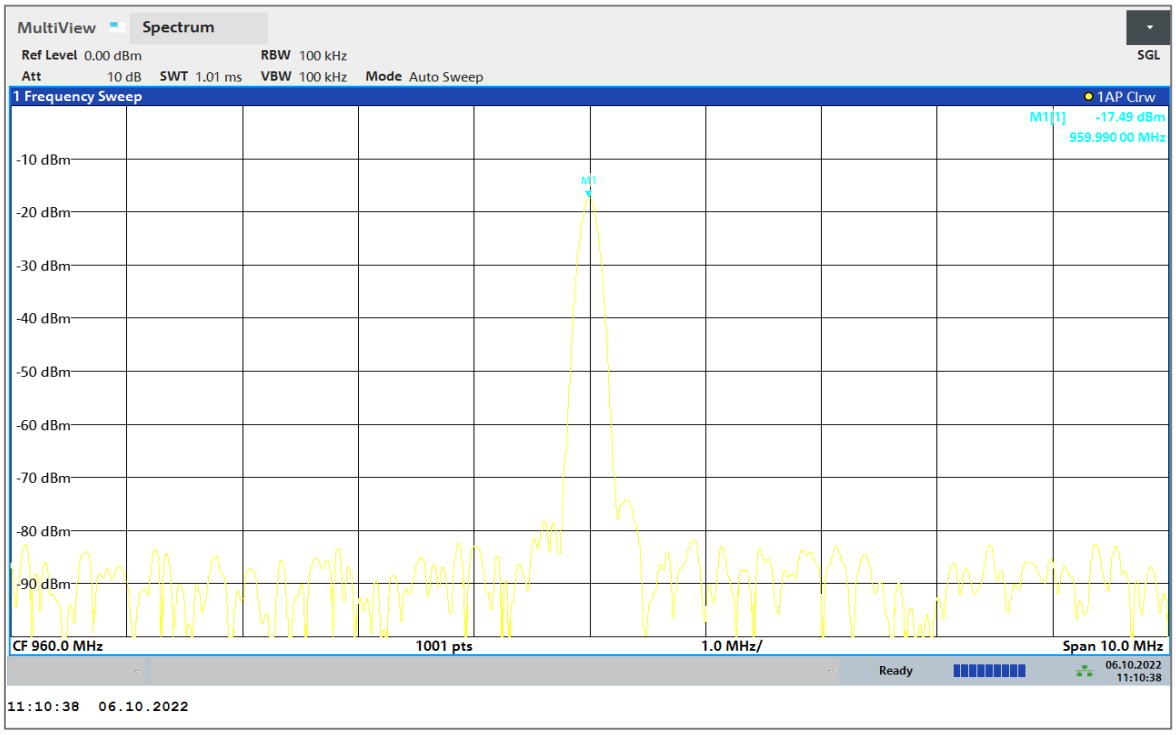
Şekil 5.91. 7 GHz Pcold ölçüm değeri



Şekil 5.92. 8 GHz kazanç ölçüm değeri



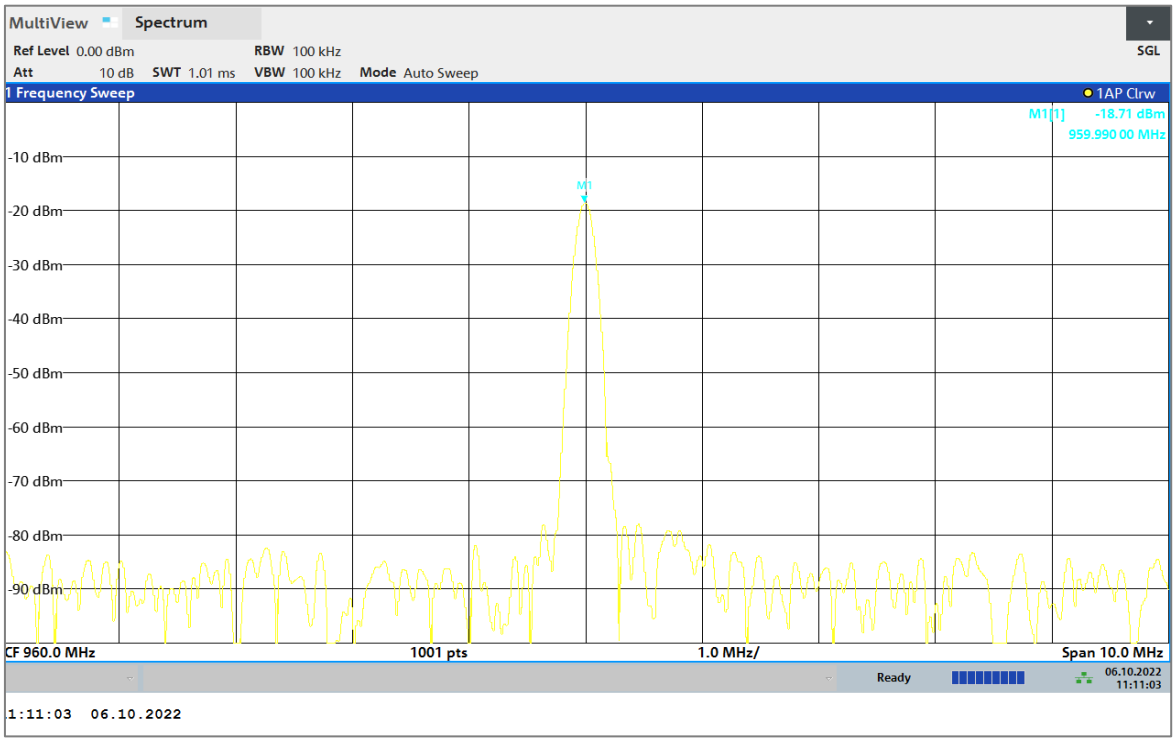
Şekil 5.93. 8 GHz Pcold ölçüm değeri



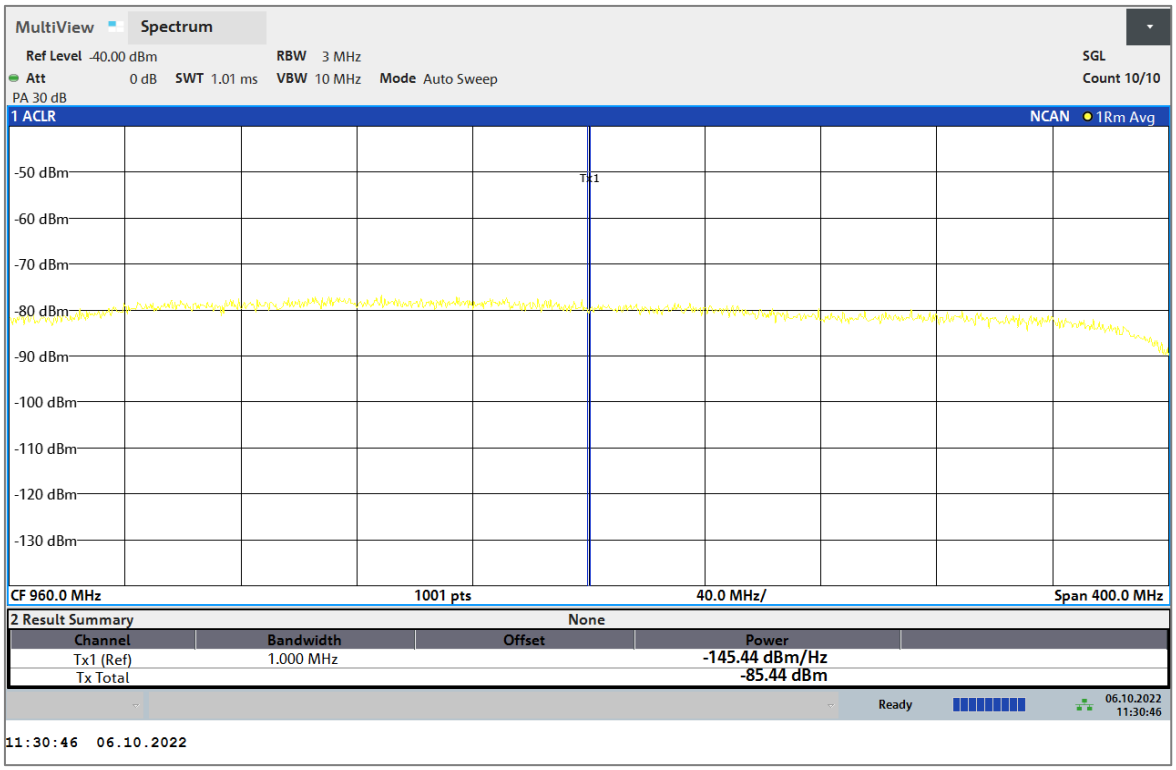
Şekil 5.94. 9 GHz kazanç ölçüm değeri



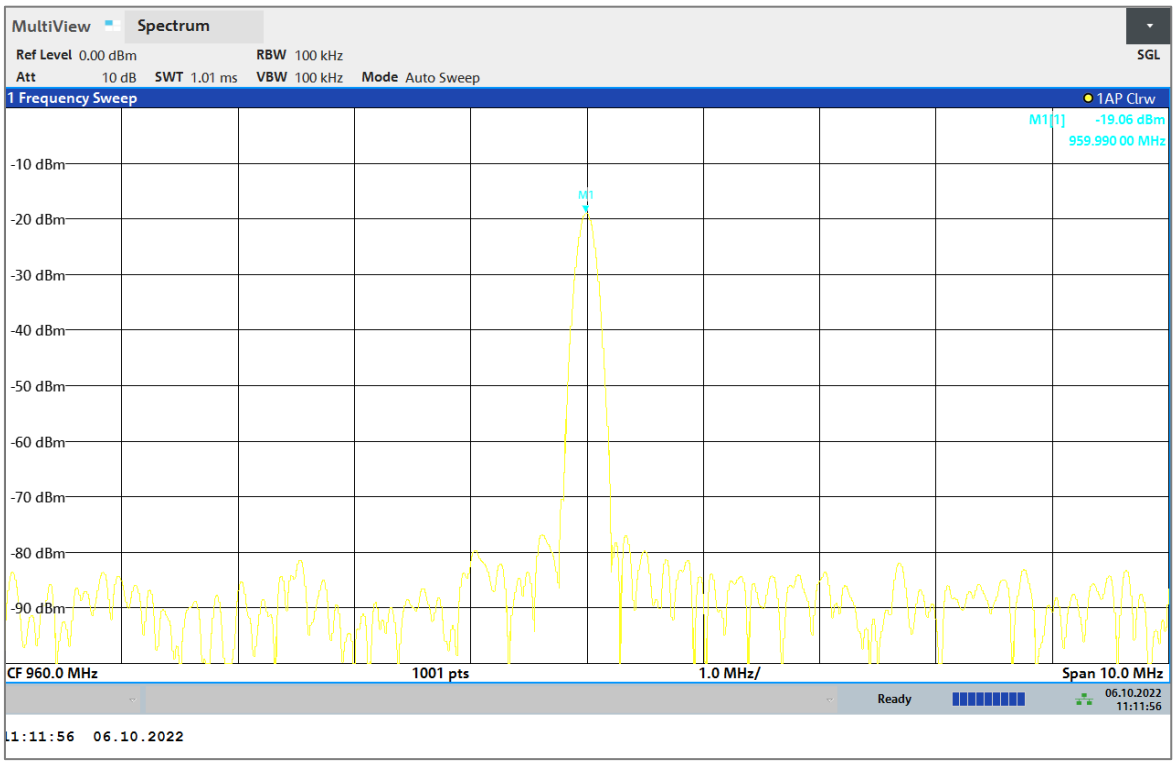
Şekil 5.95. 9 GHz Pcold ölçüm değeri



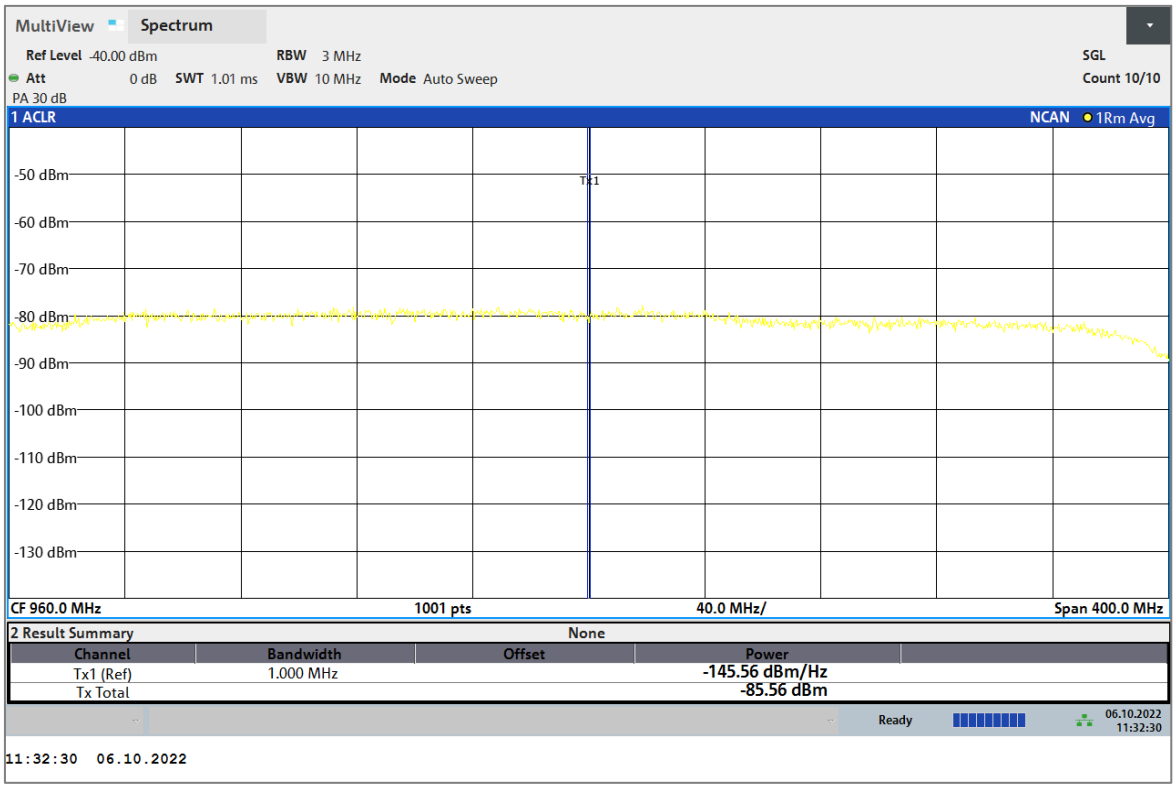
Şekil 5.96. 10 GHz kazanç ölçüm değeri



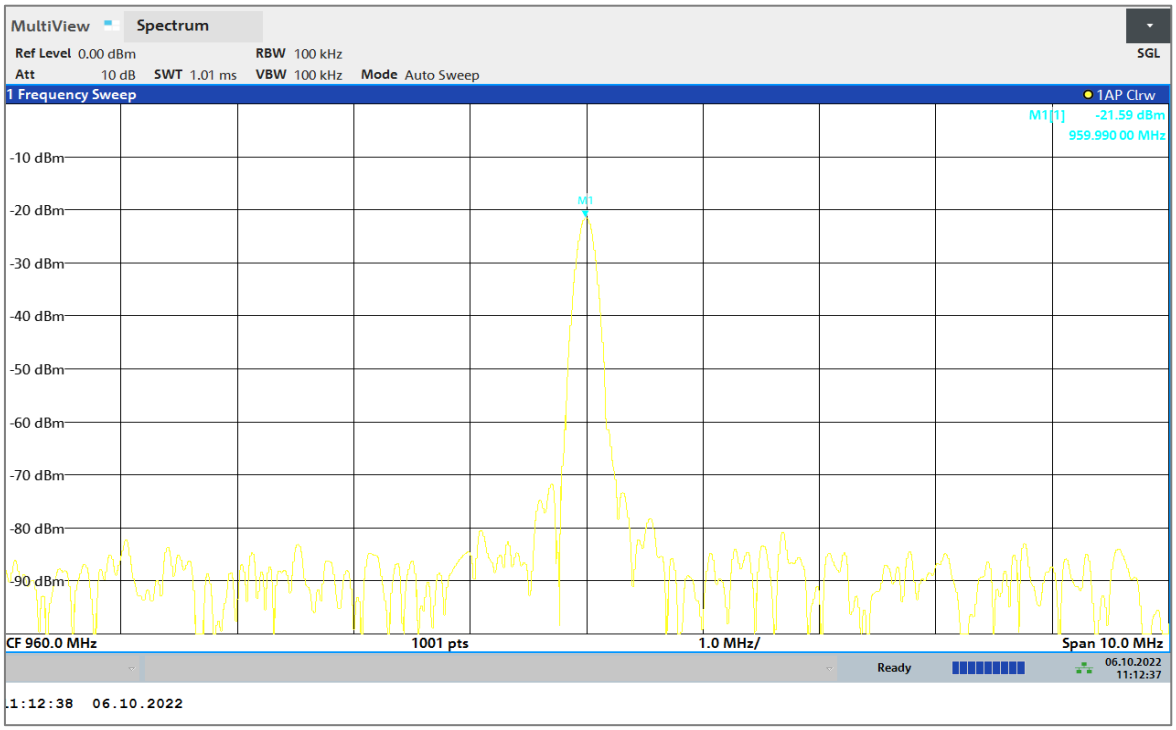
Şekil 5.97. 10 GHz Pcold ölçüm değeri



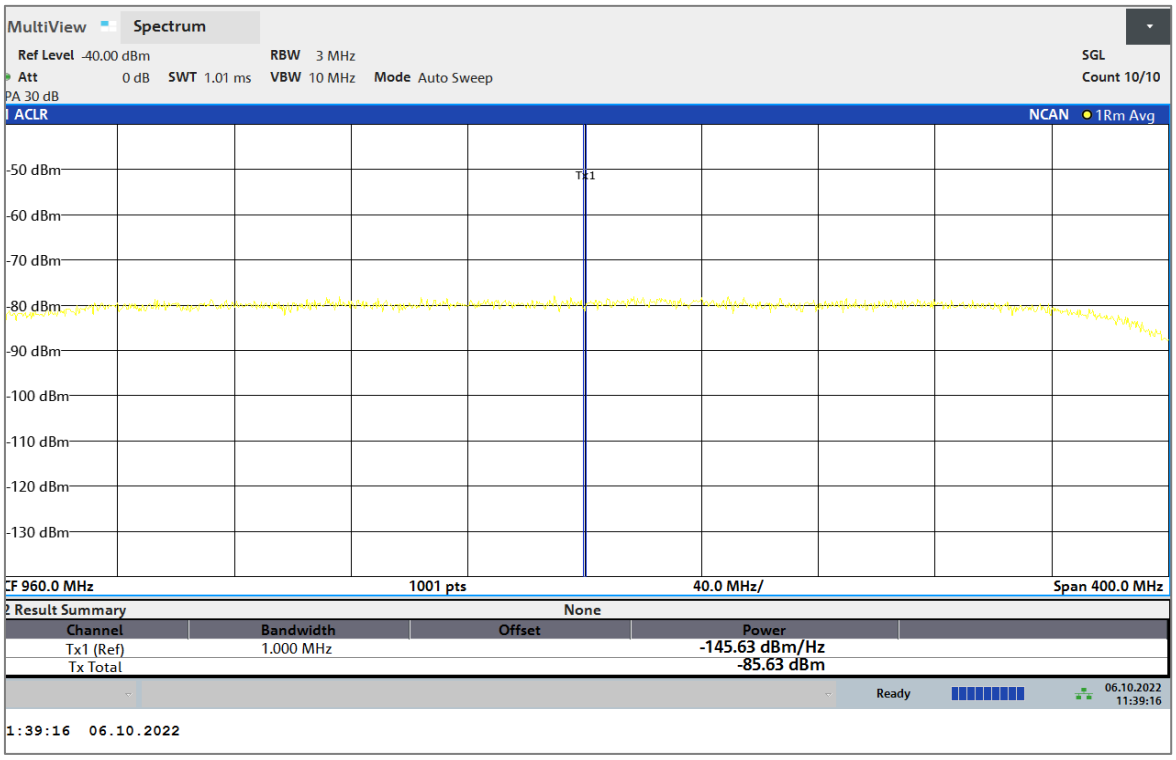
Şekil 5.98. 11 GHz kazanç ölçüm değeri



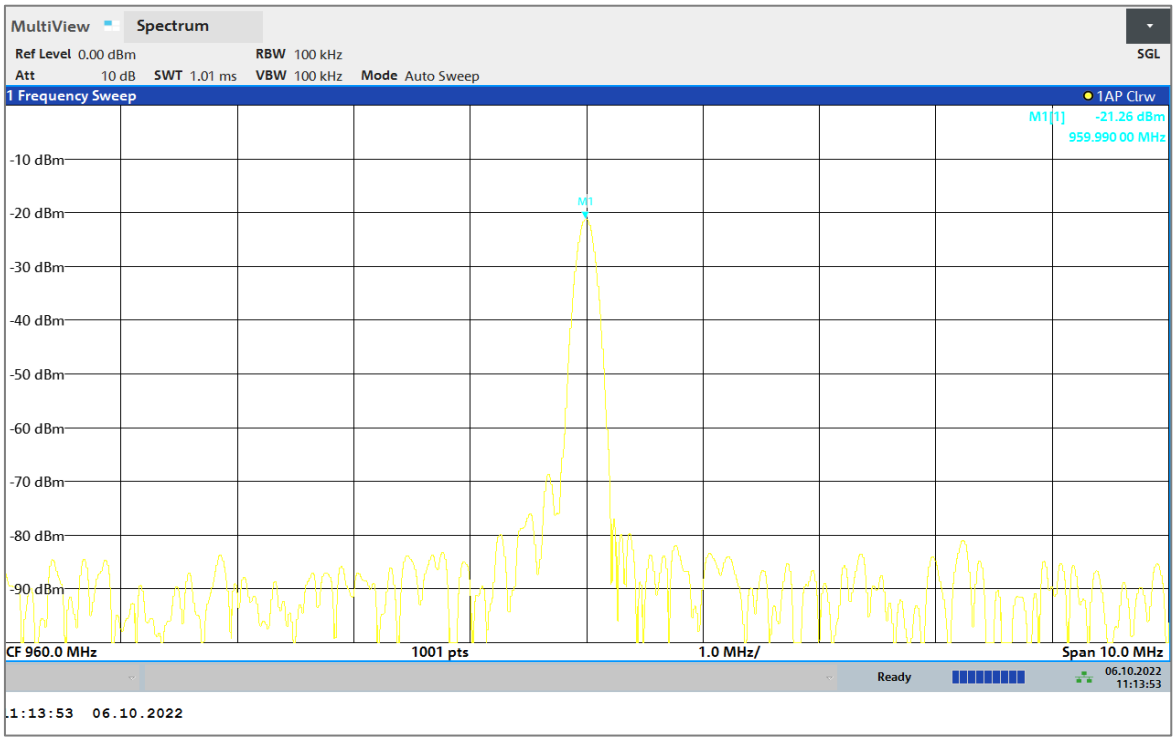
Şekil 5.99. 11 GHz Pcold ölçüm değeri



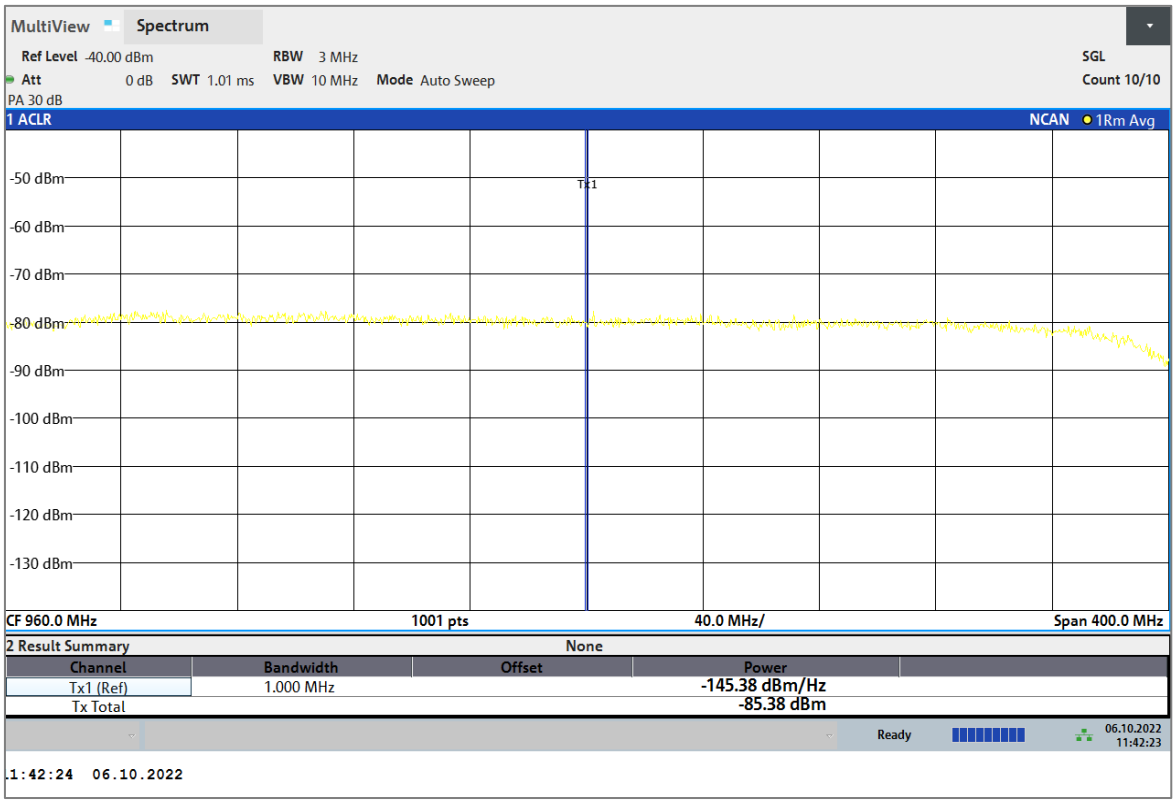
Şekil 5.100. 12 GHz kazanç ölçüm değeri



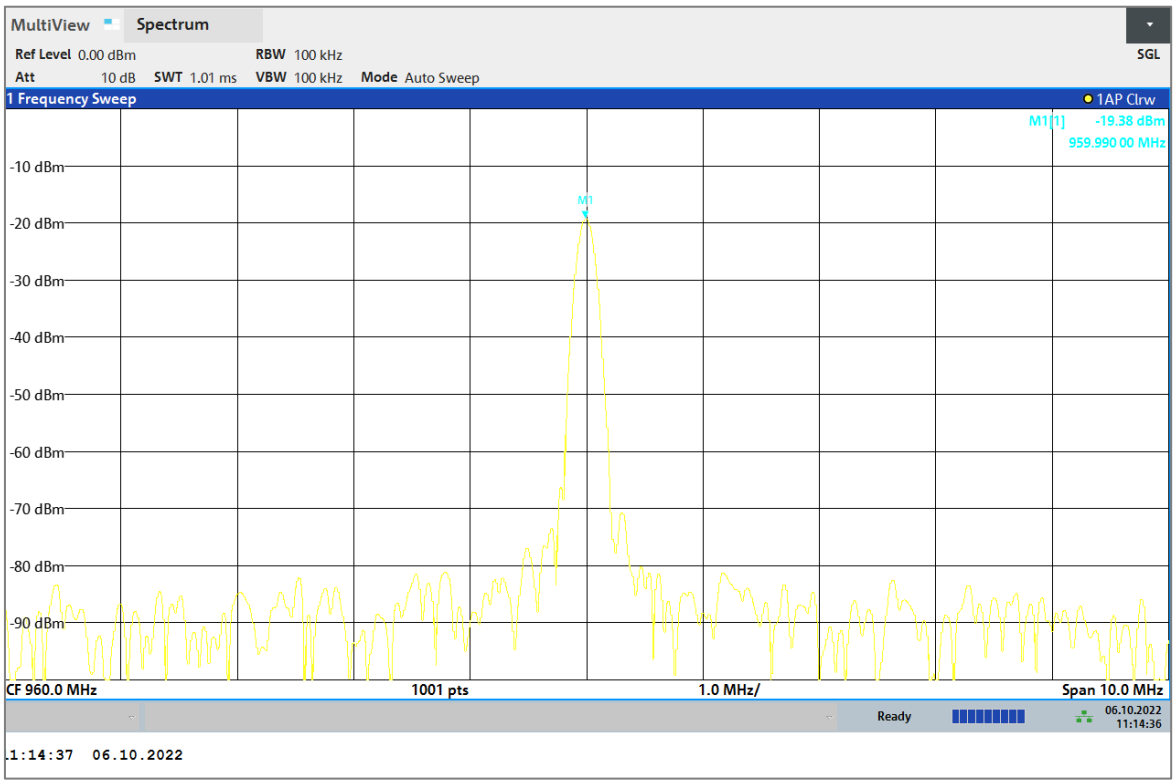
Şekil 5.101. 12 GHz Pcold ölçüm değeri



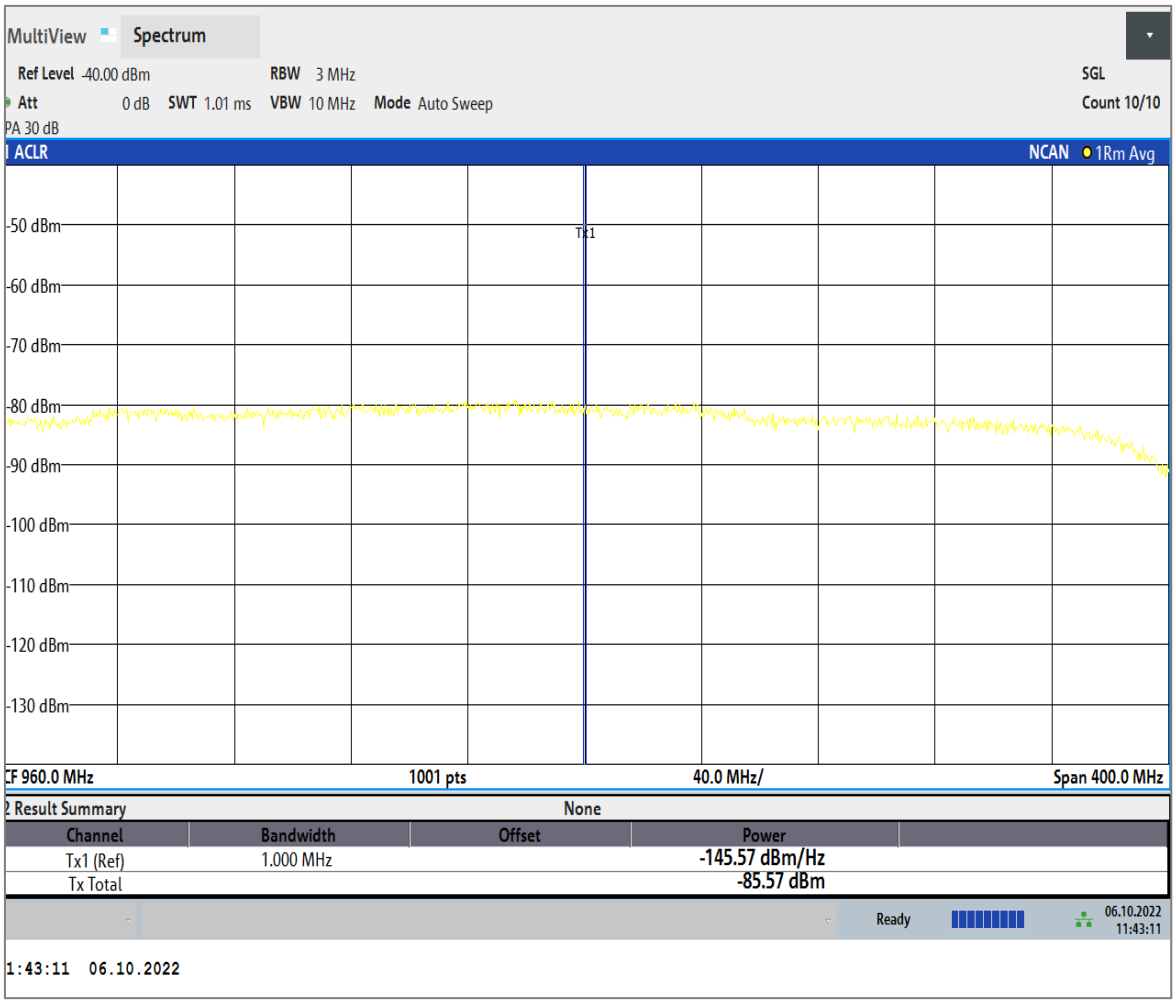
Şekil 5.102. 13 GHz kazanç ölçüm değeri



Şekil 5.103. 13 GHz Pcold ölçüm değeri



Şekil 5.104. 14 GHz kazanç ölçüm değeri



Şekil 5.105. 14 GHz Pcold ölçüm değeri

5.7. Farklı Ölçüm Metotları Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında yapılan ölçümlerde aşağıda verilen farklı test metotları kullanılmıştır.

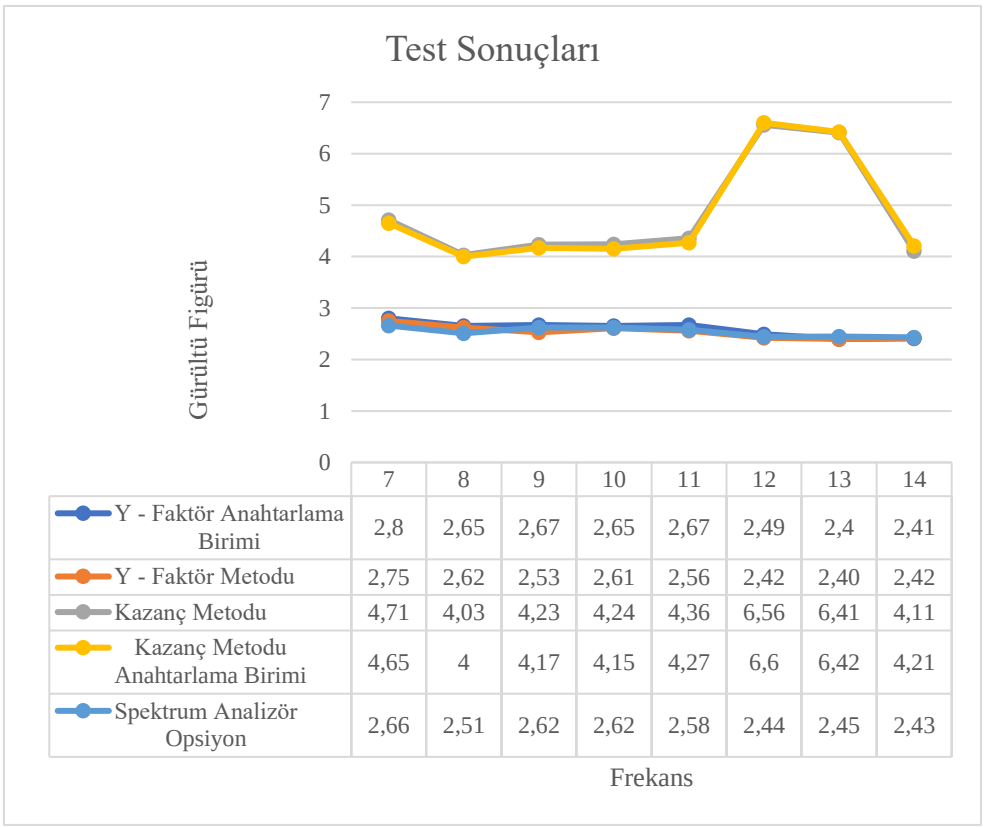
- Spektrum Analizör Opsiyonu,
- Y – Faktör Alternatif Test Düzeneği,
- Y – Faktör RF Anahtarlama Birimi,
- Kazanç Metodu,
- Kazanç Metodu RF Anahtarlama Birimi.

Bu metotlar için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8'de verilmiştir. 7-14 GHz aralığında 1 GHz aralıklarla tüm frekanslarda gürültü figürü değerleri ölçülmüştür. Şekil 5.106 Test sonuç

grafiğinde görüldüğü üzere ölçüm için en uygun test düzeneği Y – faktör alternatif test düzeneğidir. Ölçümler sonucundan Y-faktör metodunun kazanç metoduna kıyasla en uygun metot olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.8. Test sonuçları genel tablosu

Giriş Frekans (GHz)	Spektrum Analizör Opsiyonu ile	Y – Faktör Alternatif Test Düzeneği ile	Y – Faktör RF Anahtarlama Birimi	Kazanç Metodu ile	Kazanç Metodu RF Anahtarlama Birimi
7	2,66	2,75	2,8	4,71	4,65
8	2,51	2,62	2,65	4,03	4
9	2,62	2,53	2,67	4,23	4,17
10	2,62	2,61	2,65	4,24	4,15
11	2,58	2,54	2,67	4,36	4,27
12	2,44	2,42	2,49	6,56	6,6
13	2,45	2,4	2,4	6,41	6,42
14	2,43	2,42	2,41	4,11	4,21



Şekil 5.106. Test sonuç grafiği

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında otomatik test sistemlerinde gürültü figürü ölçümü teorik ve pratik uygulamalar ile incelenmiştir. Tez kapsamında alınan ölçümler doğrultusunda Y-faktör ve kazanç metodu incelenmiştir. Ayrıca yazılım ve donanım olarak alternatif bir test metodu önerilmiştir. Sonuçlar Bölüm 1.'de de verilen aşağıdaki araştırmalarla birlikte değerlendirilmiştir.

2010 yılında Joe Kelly ve Frank Goh yaptıkları araştırmada Y-faktör ve kazanç metodu karşılaştırılmalı şekilde değerlendirilmiştir. Y-faktör metodu bu çalışmada farklı kazanç ve gürültü figürü değerleri için uygun bulunmuş, aynı zamanda iki farklı ölçümün oranı olarak bakıldığı için ölçüm doğruluğunun üst seviye olduğu belirtilmiştir. Fakat gürültü üreteçleri piyasada sınırlı AGO ile üretildiği için yüksek gürültü figürüne sahip alıcı testleri için uygun olmadığına değinilmiştir. Aynı zamanda kazanç metodu da yazıda işlenmiş ve düşük kazanç ve gürültü figürüne sahip alıcılar için uygun olmadığı fakat kolay bir kuruluma sahip olduğu belirtilmiştir [1].

2020 yılında Cristian Jimenez iki ölçüm metodunu karşılaştırmış aktif ve pasif elementler için düşük frekanslarda ölçümler almıştır. Günümüzde Y-faktör metodunun kolay uygulanabilir olması ve endüstriyel cihazlarda uyumsuzluk hatalarının az olmasından kaynaklı Y-faktör metodunun kullanıldığı vurgulanmıştır [2].

Tez kapsamında yapılan ölçümlerle, ölçüm alınan alıcı için Y-faktör metodunun daha uygun olduğu tespit edilmiş ve Y-faktör metodu kullanılarak önerilen alternatif test düzeneğiyle birlikte kalibrasyon verileri minimal seviyelere indirilmiştir. Ayrıca bu alternatif test düzeneğine, uygun test yazılımı önerilmiş ve sisteme entegre edilmiştir. Böylece yazılım ve donanım olarak uygun ve özgün bir test yöntemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem, otomatik test sistemlerinde çokça kullanılan RF anahtarlama matrisi ile de uyumlu çalıştığı doğrulanmıştır.

Çalışmada gürültü figürünü ölçmek bir almaç tasarlanmıştır. Almaç girişi 7 – 14 GHz frekanslarına, çıkışı ise 960 MHz IF merkezi ve 400 MHz bant genişliğine sahiptir. Almaç içerisinde düşük gürültü figürlü bir düşük gürültü yükselteci (Low Noise Amplifier – LNA),

bir adet mikser ve bir adet de filtre kartı yer almaktadır. Almaç yaklaşık olarak 20 – 30 dB kazançlarına sahiptir.

Çalışmada gürültü figürü teorik olarak iki farklı yöntemle ve beş farklı test düzeneğinle ölçülmüş ve ölçümler karşılaştırılmıştır. Ölçümler öncesi tüm birimlerin S21 kazanç / kayıp ölçümleri alınmıştır. Labwindows / CVI programıyla çok katlı sistemlerde gürültü figürü ölçüm analiz arayüzü tasarlanmış ve teorik olarak sistemin frekansa bağlı gürültü figürü değerleri analiz edilmiştir.

Analizler sonrası ölçüm düzenekleri kurulmuş ve 1 GHz aralıklarla tüm frekanslarda gürültü figürü değerleri ölçülmüş ve raporlanmıştır. Ölçüm için en uygun test düzeneği alternatif test düzeneği ile belirtilmiştir. Y-faktör ve kazanç metodu karşılaştırıldığında en uygun metodun Y-faktör metodu olduğu analiz edilmiştir.

Y-faktör metodu karşılaştırmalı bir ölçüm algoritmasına sahip olduğu için hata payı daha düşüktür. Bu test yöntemi için en kritik nokta gürültü figürü ölçülecek sistemin gürültü figürü kullanılan gürültü üretecinin AGO değerinden büyük olmamalıdır. Doğru sonuç alınabilmesi için yaklaşık olarak 4 -5 dB bir farkı korumak önemlidir. Doğru seçilen bir gürültü üreteci ile alınan ölçümlerin doğruluğu ve kararlılığı oldukça yüksek olacaktır. Bu ölçümlerde Y-faktör test düzeneğini biraz daha karmaşık hale getirilebilmek için test düzeneğine anahtarlama birimi eklenmiştir. RF anahtarlama biriminin kaybı normalize edilmiştir. Bu normalizasyon ile ölçüm sonuçlarında bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu sayede test düzeneğinin otomatik test sistemlerine uygunluğu doğrulanmıştır.

Diğer yandan kazanç metodu da oldukça kullanılan başka bir test metodu olarak bilinmektedir. Fakat sistemin kazancı düştükçe ölçümdeki doğruluk ve kararlılık da paralel olarak düşmektedir. Y-faktör metodu gibi bu test metodunda da RF anahtarlama birimi kullanılmıştır. RF anahtarlama biriminin normalizasyonu yapılarak alınan ölçümlerde değişiklik gözlemlenmemiştir. Ancak kazanç metodu ile alınan ölçümlerde bazı frekans noktalarında ölçümlerde yükselmeler gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak iki teorik yöntem kıyaslandığında; Y-faktör metodunun iki ölçümün (cold ve hot) karşılaştırılmasına bağlı olduğu için daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Tez

çalışmasında ayrıca, tasarım veya üretim aşamasında ölçülecek sitemin test düzeneği kurulurken dikkat edilmesi gereken noktalar belirtilmiştir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Kelly, J. and Goh, F. (2010). The basics of Noise Figure Measurements for ATE. URL:https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN2875.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

2. İnternet: Jimenez, C. (2020). Noise figure Measurement with Y-Factor and cold source method Laboratory 1 Noise & Interferences. URL: https://www.researchgate.net/publication/345149983_Noise_figure_Measurement_with_Y-Factor_and_cold_source_method_Laboratory_1_Noise_Interferences, Son Erişim Tarihi: 01.01.2023.

3. İnternet: National Instruments. (2004). Getting Started with LabWindows/CVI. URL: https://www.nikhef.nl/~h73/ccursus/docu_ccursus/docu_labwindows.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

4. İnternet: National Instruments. (1998). Labwindows / CVI User Interface Reference Manual. URL: https://usermanual.wiki/Collections/National-Instruments/320683d.pdf, Son Erişim Tarihi. 27.11.2022.

5. Egan, W.F. (2003). *Practical RF System Design*. New York: Wiley–IEEE.

6. Crampton, R., Hudgins, D. and Heisley, D. (2004). Noise management in portable rf systems. *Portable Power Design Seminar*, 6-1-6-8.

7. Pozar, D. M. (2014). *Mikrodalga Mühendisliği.* (Çev. A. Köksal, M. Bulut, I. Sayın, H. Aşkar, S. Özdemir, A. Ünal). Ankara: Palme Yayıncılık. (Eserin orijinali 1998'de yayımlandı).

8. Ng, E. (2011). Johnson and Shot Noise: Determinations of k, Absolute Zero, and e. MIT Department of Physics.

9. Chorti, A., and Brookes, M. (2006). A Spectral Model for RF Oscillators With Power–Law Phase Noise. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 53 (9), 1989–1999.

10. İnternet: Keysight EEsof EDA. (2017). Overview on Phase Noise and Jitter. URL: https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01984/technical-overviews/5990-3108.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

11. Mancini, R. (Ed.). (2009). *Op amps for everyone*. Dallas: Texas Instruments.

12. İnternet: Tetronix. (2014). Overview of Noise Measurement Methods. URL: https://www.tek.com/en/documents/whitepaper/noise-figure-overview-noise-measurement-methods, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

13. İnternet: Keysight. (2017). Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements, URL: https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06808/application-notes/5952-8255.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

14. İnternet: Anritsu, (2016). Noise Figure Measurement Methods. URL: https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/solutions/en-us/noise-figure-measurements-vectorstar, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

15. Taşcı, M. (2019). *S-bant GAN tabanlı düşük gürültülü yükselteç tasarımı ve karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Ankara, 1-52.

16. Coşkun, A.A. (2017). *Gain variation and noise figure degradation in balanced amplifiers*, Phd Dissertation, Bilkent University, Ankara, 18-34.

17. Yılmaz, M. (2015). *A two stage X-band low noise amplifier optimized for minimum noise application*, Master Thesis, Bilkent University, Ankara, 6-15.

18. Steer, M. (2019). *Microwave and RF design modules* (Third edition). USA: North Carolina State University Libraries.

19. Saydam, N. (2019). *K- band düşük gürültülü yükselteç tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-10.

20. Arican, G. O., Akçam, N. ve Yazgan, E. (2020). Ku-band GaAs mHEMT MMIC and RF front-end module for space applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 63(2), 417 – 425.

21. Kazan, O. (2018). *Gan-based robust low-noise amplifier*. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 27-29.

22. İnternet: Loy, M. (1999). Understanding and Enhancing Sensitivity in Receivers for Wireless Applications. URL: http://www-classes.usc.edu/engr/ee-ep/475/Recievers.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

23. İnternet: Poshala, P., Rushil, K.K. and Gupta, R. (2014). Signal Chain Noise Figure Analysis. URL: https://www.ti.com/lit/an/slaa652/slaa652.pdf?ts=1669548653320&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com.tr%252F, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

24. Smith, B. E. (2004). *Enhancing the instantaneous dynamic range of electronic warfare receivers using statistical signal processing*. Master Thesis, Air University, USA, 2-1.

25. Sun, J., Lu, C., Wang, M., Yuan, H., and Qi, L. (2017). Performance assessment and prediction for superheterodyne receivers based on mahalanobis distance and time sequence analysis. *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation*.

26. Peurala, M. (2022). *Automated RF line testing.* Bachelor's Thesis, Metropolia University of Applied Sciences, Finland, 7-9.

27. İnternet: Keysight. (2022). Vector Network Analyzers. URL: https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01698/technical-overviews/5989-7603.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11:2022.

28. İnternet: Keysight. (2016). Keysight Technologies Spectrum Analysis Basics. URL: https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06714/application-notes/5952-0292.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

29. İnternet: Rohde & Schwarz. (2016). Modulation and Signal Generation with R&S® Signal Generators. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma225/1MA225_2e_Modulation_Signal_Generation.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

30. İnternet: Cory, R. and Fryklund, D. (2009). Solid State RF/Microwave Switch Technology: Part 2. URL: https://www.rfmw.com/datasheets/skyworks/4b_solid_state_rfmicrowave_switchtechnology_part2.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

31. Pirkl, Z. (2014). *Design and integration of an expandable radio frequency switch matrix using cots components*, Master Thesis, San Jose State University, USA, 12-39.

32. Bizyukov, P. E., Radchenko, D. S., Tokarev, A. B., Matveev, B. V., Povetko, V. N., and Slinchuk, S. A. (2020). *Automation of full-scale regression testing of radio monitoring equipment.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 862.

33. Thomas, T., Thomas, A., & Sreekumar, V. M. (2017). *Design and development of an automated RF test platform for low noise Pre-Amp.* 2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), IEEE, 177-180.

34. İnternet: Nordic Semiconductor. (2008). RF Performance Test Guidelines. URL:https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nwp_006.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

35. İnternet: Maxim. (2003). Three Methods of Noise Figure Measurement. URL:https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN2875.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

36. İnternet: Agilent Technologies. (2001). Noise Figure Measurement Accuracy – The Y – Factor Method. URL: https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06829/application-notes/5952-3706.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.

37. İnternet: Leffel, M. and Daniel, R. (2021). The Y Factor Technique for Noise Figure Measurements. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma178/1MA178_5e_NoiseFigure.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.11.2022.



Gazili olmak ayrıcalıktır