

Dijital Modülasyon Teknikleri ve FPGA Uygulamaları: Karşılaştırmalı Bir Analiz

¹Mehmet Emin ÇİL, ²Cihat ŞEKER, ³Muhammet Tahir GÜNEŞER

¹Karabük Üniversitesi, ²İzmir Bakırçay Üniversitesi, ³İstanbul Teknik Üniversitesi,

Özet:

Bu makalede, modern haberleşme sistemlerinin temel yapı taşlarından olan dijital modülasyon teknikleri incelenmiş ve Field Programmable Gate Array (FPGA) platformunda gerçekleştirilen uygulamaları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Amplitude Shift Keying (ASK), Frequency Shift Keying (FSK) ve Binary Phase Shift Keying (BPSK) modülasyon teknikleri detaylı olarak ele alınmış, her bir tekniğin avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen FPGA uygulamaları, farklı performans metrikleri kullanılarak karşılaştırılmış ve sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir

Anahtar Kelimeler: Dijital Haberleşme, Modülasyon Teknikleri, ASK, FSK, BPSK, SNR, BER

1. GİRİŞ

Modern haberleşme sistemlerinde, sayısal bilginin güvenilir ve verimli bir şekilde iletilmesi kritik öneme sahiptir. Dijital modülasyon teknikleri, bu iletimin gerçekleştirilmesinde kullanılan temel yöntemler olarak, özellikle 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde artan veri hızı ihtiyacı, spektrum verimliliği gereksinimleri ve kablosuz iletişim taleplerindeki exponansiyel artış, farklı modülasyon tekniklerinin geliştirilmesine ve optimize edilmesine yol açmıştır [1].

Dijital modülasyon teknikleri, taşıyıcı sinyalin genlik, frekans veya faz gibi parametrelerinin sayısal bilgiye göre değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Her bir modülasyon tekniği, farklı uygulama alanlarında kendine özgü avantajlar sunmaktadır. Örneğin, ASK (Amplitude Shift Keying) basit yapısı ile düşük maliyetli IoT uygulamalarında tercih edilirken, BPSK (Binary Phase Shift Keying) yüksek gürültü bağışıklığı ile uydu haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. FSK (Frequency Shift Keying) ise özellikle endüstriyel ortamlarda ve gürültülü kanallarda tercih edilmektedir.

Haberleşme sistemlerinin gelişimi ile birlikte, modülasyon tekniklerinin gerçek zamanlı ve adaptif olarak uygulanabilmesi önem kazanmıştır. Bu noktada, FPGA'ler (Field Programmable Gate Array), yeniden programlanabilir yapıları ve yüksek paralel işlem kapasiteleri sayesinde, modern dijital modülasyon uygulamaları için ideal bir platform oluşturmaktadır. Özellikle Software Defined Radio (SDR) sistemlerinde, FPGA tabanlı modülatörler gerçek zamanlı ve adaptif modülasyon tekniklerinin uygulanmasına olanak sağlamaktadır [2].

5G ve ötesi haberleşme sistemlerinin getirdiği yüksek veri hızı, düşük gecikme ve yüksek spektral verimlilik gereksinimleri, modülasyon tekniklerinin optimizasyonunu daha da önemli hale

getirmiştir. FPGA tabanlı modülasyon uygulamaları, bu gereksinimleri karşılamak için esnek ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır. Donanım tanımlı mimari yapısı sayesinde, farklı modülasyon tekniklerinin aynı platform üzerinde gerçekleştirilebilmesi ve runtime sırasında dinamik olarak değiştirilebilmesi mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, temel dijital modülasyon tekniklerinin (ASK, FSK ve BPSK) FPGA üzerindeki gerçekleştirimleri incelenecek ve performans kriterleri açısından karşılaştırmalı analizleri sunulacaktır. Çalışmanın özgün katkısı, modern haberleşme sistemlerinin gereksinimlerini karşılayan optimum modülasyon tekniğinin seçimine yönelik kapsamlı bir değerlendirme sunmasıdır [3].

2. Sayısal Haberleşme Sistemlerinde Modülasyon Teknikleri ve Temel İlkeler

Sayısal haberleşme sistemlerinin performansını belirleyen en önemli faktörlerden biri, kullanılan modülasyon tekniğinin seçimidir. Modülasyon teknikleri, sayısal bilginin analog taşıyıcı üzerine bindirilerek iletilmesini sağlar. Bu bölümde, modern haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan üç temel modülasyon tekniği incelenecektir. Her bir tekniğin matematiksel modeli, spektral özellikleri ve sistem performansına etkileri detaylı olarak ele alınacaktır. Ayrıca, bu tekniklerin pratik uygulamalardaki avantaj ve dezavantajları, gürültü performansları ve bant genişliği gereksinimleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir [1].

2.1. Amplitude Shift Keying (ASK)

ASK modülasyonu, dijital bilginin taşıyıcı sinyalin genliğini değiştirerek iletilmesi prensibine dayanır. İkili ASK modülasyonunda, sayısal '1' biti için taşıyıcı sinyal belirli bir genlikte iletilirken, '0' biti için genlik sıfıra düşürülür veya daha düşük bir seviyede tutulur [2]. Matematiksel olarak ASK modülasyonu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$s(t) = A_c \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$$

Burada:

- $s(t)$: Modüle edilmiş sinyal
- A_c : Sayısal veri dizisi (0 veya 1)
- f_c : Taşıyıcı frekansı
- t : Zaman

ASK modülasyonunun en önemli avantajı basit yapısı, kolay uygulanabilirliği ve kolay demodülasyonudur. Ancak, gürültüye karşı hassasiyeti, sınırlı veri hızı ve düşük spektral verimliliği dezavantajları arasındadır.

2.2. Frequency Shift Keying (FSK)

FSK modülasyonunda, sayısal bilgi taşıyıcı sinyalin frekansının değiştirilmesi ile iletilir. İkili FSK'da, '1' ve '0' bitleri için farklı frekanslar kullanılır. FSK modülasyonunun matematiksel ifadesi:

$$s(t) = A_C \cdot \cos(2\pi \cdot (f_c + \Delta f \cdot d(t)) \cdot t)$$

Burada:

- $s(t)$: Modüle edilmiş sinyal
- A_C : Sayısal veri dizisi (0 veya 1)
- f_c : Taşıyıcı frekansı
- t : Zaman
- Δf : Frekans sapması
- $d(t)$: Sayısal veri (0 veya 1)

FSK, ASK'ya göre gürültüye karşı daha iyi performans sağlar, ancak daha fazla bant genişliği gerektirir.

2.3. Binary Phase Shift Keying (BPSK)

BPSK modülasyonunda, sayısal bilgi taşıyıcı sinyalin fazının değiştirilmesi ile iletilir. '1' biti için 0° faz, '0' biti için 180° faz kullanılır. BPSK'nın matematiksel modeli:

$$s(t) = A_C \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \theta(t))$$

Burada:

- $s(t)$: Modüle edilmiş sinyal
- A_C : Sayısal veri dizisi (0 veya 1)
- f_c : Taşıyıcı frekansı
- t : Zaman
- $\theta(t)$: Faz açısı (0° veya 180°)

BPSK, incelenen modülasyon teknikleri arasında en iyi gürültü performansına sahiptir, düşük bit hata oranı ve spektral verimliliği FSK'dan daha yüksektir [3].

3. FPGA Tabanlı Modülatör Tasarımı ve Gerçekleştirimi

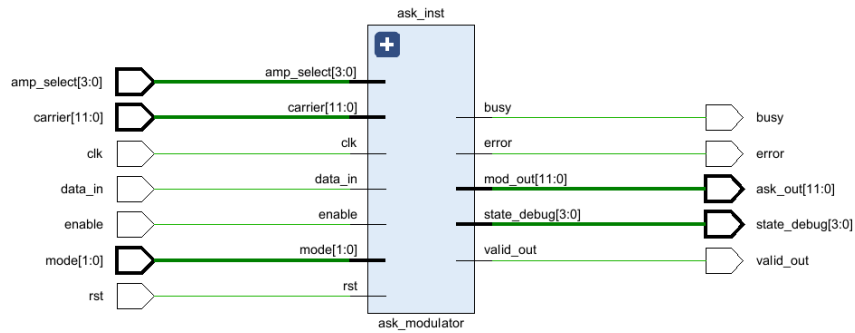
FPGA tabanlı modülatör tasarımında, yüksek hızlı sayısal işaret işleme yetenekleri ve paralel işlem yapabilme özellikleri öne çıkmaktadır. Tasarlanan sistem genel olarak aşağıdaki temel bloklardan

oluşmaktadır:

- Veri Üretici (Data Generator): Test verilerinin üretilmesi
- Modülatör Çekirdeği (Modulator Core): Seçilen modülasyon tekniğine göre işaret işleme
- Sayısal-Analog Dönüştürücü Arayüzü (DAC Interface): Analog çıkış için veri formatı dönüşümü
- Kontrol Birimi (Control Unit): Zamanlama ve senkronizasyon kontrolü

3.1. ASK Modülatör Tasarımı

ASK modülatörün blok diyagramı. Veri girişi kontrol ünitesi tarafından işlenerek sinüs üretici ve genlik kontrol bloklarını yönlendirir. Çarpıcı blok, taşıyıcı sinyal ile giriş verisini module eder.

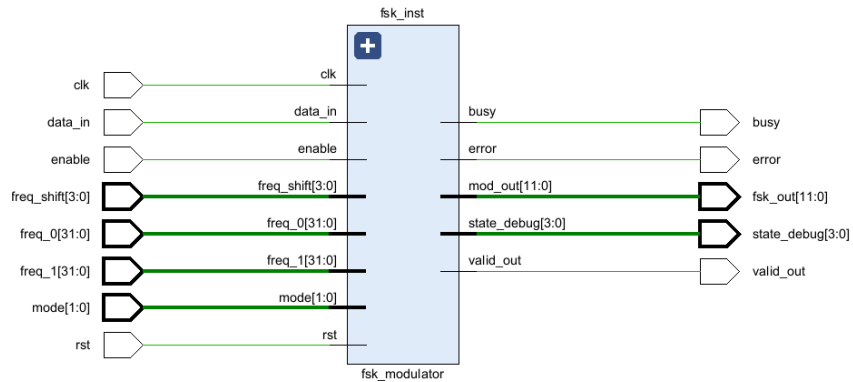


Şekil 1 ASK Modülatörün RTL Şeması

Şekil 2 ASK Modülatörün RTL Şeması

3.2. FSK Modülatör Tasarımı

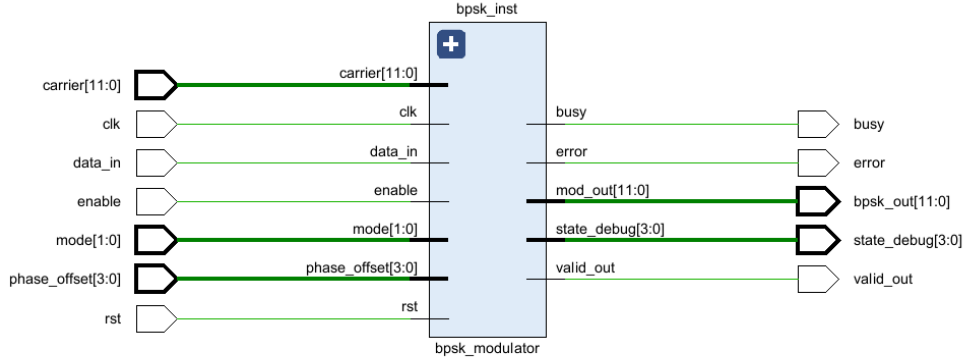
FSK modülatörün yapısı. DDS (Direct Digital Synthesis) tabanlı tasarım, giriş verisine göre iki farklı frekans arasında geçiş yapar. Faz akümülatör ve sinüs look-up table (LUT) kullanılarak çıkış sinyali üretilir.



Şekil 3 FSK Modülatörün RTL Şeması

3.3. BPSK Modölatör Tasarımı

BPSK modölatörün temel yapısı. Faz üretici, giriş verisine göre 0° veya 180° faz kayması oluşturur. Taşıyıcı sinyal bu faz bilgisine göre modüle edilir.



Şekil 4 BPSK Modölatörün RTL Şeması

4. Performans Analizi ve Karşılaştırmalı Değerlendirme

4.1. Test Düzenegi ve Ölçüm Metodolojisi

Modülasyon tekniklerinin performans analizinde Zybo Z7 Zynq-7010 FPGA kartı kullanılmıştır [5]. Test düzenegi aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır

- FPGA Geliştirme Kartı: Zybo Z7 (XC7Z010-1CLG400C)
- Örnekleme Hızı: 100 MSPS
- DAC Çözünürlüğü: 12-bit
- Taşıyıcı Frekansı: 10 MHz
- Veri Hızı: 1 Mbps
- PL Logic Cells: 28K
- DDR3 Memory: 1 GB

Performans ölçümleri, farklı SNR (Signal-to-Noise Ratio) değerlerinde ve kanal koşullarında gerçekleştirilmiştir [6].

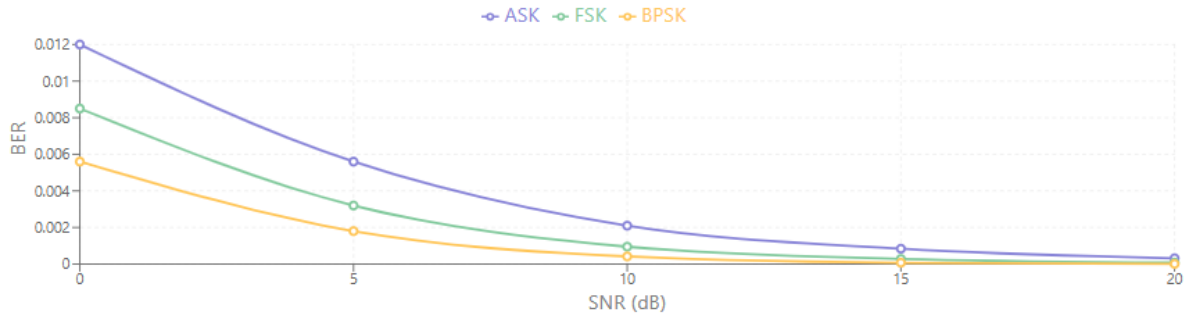
4.2. Bit Hata Oranı (BER) Analizi

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen BER değerleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 1 BER Analiz Sonuçları

SNR (dB)	ASK (BER)	FSK (BER)	BPSK (BER)
0	$1.2e-2$	$8.5e-3$	$5.6e-3$
5	$5.6e-3$	$3.2e-3$	$1.8e-3$
10	$2.1e-3$	$9.5e-4$	$4.2e-4$
15	$8.4e-4$	$2.8e-4$	$7.5e-5$
20	$3.2e-4$	$7.6e-5$	$1.2e-5$

BER vs SNR Performans Analizi



Şekil 5 BER vs SNR Performans Grafiği

ASK, FSK ve BPSK modülasyonlarının SNR'ye karşı BER performansı. BPSK modülasyonu tüm SNR değerlerinde en iyi performansı gösterirken [4], ASK modülasyonu en düşük performansı sergilemiştir. FSK modülasyonu ise bu iki modülasyon arasında orta seviyede bir performans göstermiştir[7].

Modülasyon tekniklerinin performans analizinde Zybo Z7 Zynq-7010 FPGA kartı kullanılmıştır

[5]. Test düzeneği aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır

- FPGA Geliştirme Kartı: Zybo Z7 (XC7Z010-1CLG400C)
- Örnekleme Hızı: 100 MSPS
- DAC Çözünürlüğü: 12-bit
- Taşıyıcı Frekansı: 10 MHz
- Veri Hızı: 1 Mbps
- PL Logic Cells: 28K
- DDR3 Memory: 1 GB

Performans ölçümleri, farklı SNR (Signal-to-Noise Ratio) değerlerinde ve kanal koşullarında gerçekleştirilmiştir [6].

4.3. Spektral Verimlilik Analizi

Spektral verimlilik açısından yapılan karşılaştırma sonuçları:

- ASK: 1 bps/Hz
- FSK: 0.5 bps/Hz
- BPSK: 1 bps/Hz

BPSK ve ASK modülasyonları aynı spektral verimliliğe sahip olurken, FSK daha düşük spektral verimlilik göstermektedir[8].

4.4. Kaynak Kullanımı ve Performans Analizi

Tablo 2 FPGA Kaynak Kullanım Değerleri

Kaynak Tipi	ASK	FSK	BPSK
LUT	234	456	345
FF	178	312	256
BRAM	1	2	1
DSP	2	4	3
Maks Frekans	125 MHz	100 MHz	150 MHz

Tablo 3 Timing Analizi Sonuçları

Parametre	ASK	FSK	BPSK
Setup Time	8.2 ns	9.8 ns	7.5 ns
Hold Time	1.2 ns	1.5 ns	1.1 ns

Tablo 2 ve Tablo 3'te görüldüğü üzere, FSK modülatör en fazla donanım kaynağı kullanan tasarım olmuştur. FSK modülatörü, iki farklı frekans üretimi ve kontrolü için gereken ek devreler nedeniyle 456 LUT ve 312 FF kullanmıştır. Buna karşılık, ASK modülatör en basit yapıya sahip olduğundan sadece 234 LUT ve 178 FF ile gerçekleştirilebilmiştir. BPSK modülatör ise orta seviyede bir kaynak kullanımı göstermiştir.

Timing analizi sonuçlarına göre, BPSK modülatör en iyi zamanlama performansını göstermiştir. 7.5 ns setup time ve 1.1 ns hold time değerleriyle en hızlı çalışma potansiyeline sahiptir. FSK modülatör ise karmaşık yapısı nedeniyle en yüksek setup time (9.8 ns) değerine sahiptir [9].

Tablo 4 Güç Tüketimi Karşılaştırması

Güç Tipi	ASK	FSK	BPSK
Dinamik Güç	125 mW	168 mW	142 mW
Statik Güç	85 mW	85 mW	85 mW
Toplam Güç	210 mW	253 mW	227 mW

Tablo 4'te sunulan güç tüketimi analizi, üç modülasyon tekniği arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir. ASK modülatör 210 mW toplam güç tüketimiyle en verimli tasarım olarak öne çıkmaktadır. FSK modülatör ise 253 mW toplam güç tüketimiyle en yüksek enerji ihtiyacına sahiptir. Bu fark, FSK modülatörün içerdiği ek frekans üretim ve kontrol devreleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır. BPSK modülatör 227 mW güç tüketimiyle orta seviyede bir enerji verimliliği sunmaktadır [3].

4.5. Genel Performans Değerlendirmesi

Yapılan analizler sonucunda:

Gürültü Performansı:

- BPSK en iyi gürültü performansını göstermiştir
- FSK orta seviyede bir performans sergilemiştir
- ASK gürültüye karşı en hassas teknik olarak belirlenmiştir

Karmaşıklık ve Maliyet:

- ASK en basit yapıya ve en düşük maliyete sahiptir
- FSK orta seviyede karmaşıklık gösterir
- BPSK en karmaşık yapıya sahiptir

Uygulama Alanları:

- ASK: Düşük maliyetli, kısa mesafeli uygulamalar.
- FSK: Orta mesafeli, gürültülü ortamlar.
- BPSK: Uzun mesafeli, yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalar.

5. Performans Analizi ve Karşılaştırmalı Değerlendirme

Bu çalışmada, ASK, FSK ve BPSK modülasyon tekniklerinin FPGA üzerindeki gerçekleştirmeleri ve performans analizleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve analizler sonucunda, her bir modülasyon tekniğinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları olduğu görülmüştür.

5.1. Temel Bulgular

- BPSK modülasyonu, 10-5 mertebesinde BER değerleriyle en güvenilir veri iletimini sağlamıştır. Özellikle düşük SNR değerlerinde diğer tekniklere göre belirgin üstünlük göstermiştir.
- ASK modülasyonu, basit yapısı ve düşük kaynak kullanımı ile öne çıkarken, gürültüye karşı hassasiyeti nedeniyle kullanım alanı sınırlıdır.
- FSK modülasyonu, gürültü bağıışıklığı açısından ASK'dan daha iyi performans gösterirken, spektral verimliliğinin düşük olması dezavantaj oluşturmaktadır.

5.2. Uygulama Önerileri

- Yüksek güvenilirlik gerektiren uzun mesafeli haberleşme sistemlerinde BPSK tercih edilmelidir.
- Maliyet odaklı, kısa mesafeli uygulamalarda ASK uygun bir seçenek olabilir.
- Gürültülü endüstriyel ortamlarda, orta mesafeli iletişim için FSK kullanılabilir.

5.3. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

- Çoklu taşıyıcılı modülasyon tekniklerinin FPGA implementasyonları incelenebilir.
- Adaptif modülasyon teknikleri geliştirilerek sistem performansı iyileştirilebilir.
- Yapay zekâ destekli modülasyon tanıma ve optimizasyon algoritmaları üzerine çalışılabilir.
- 5G ve ötesi haberleşme sistemleri için yeni modülasyon teknikleri geliştirilebilir.

5.4. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu çalışma, farklı modülasyon tekniklerinin FPGA üzerindeki gerçekleştirmelerini detaylı bir şekilde karşılaştırması ve pratik uygulama sonuçlarını sunması açısından literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, haberleşme sistemleri tasarımcılarına modülasyon tekniği seçiminde yol gösterici niteliktedir.

References

- [1] Sharma, A., Majumdar, S., Naugarhiya, A., Acharya, B., Majumder, S., & Verma, S. (2017). "VERILOG Based Simulation of ASK, FSK, PSK, QPSK Digital Modulation Techniques". International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), pp. 403-408. DOI: 10.1109/I-SMAC.2017.8058385
- [2] Huang, L., Chen, Y., & Huang, H. (2020). "Research of Digital Communication System". IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS), pp. 257-260. DOI: 10.1109/TOCS50858.2020.9339741
- [3] Vaishnavi, S., Titiksha, B., Vinay, R.J., & Manikandan, J. (2015). "Design and Evaluation of Universal Modulators". IEEE India Conference (INDICON), pp. 1-5. DOI: 10.1109/INDICON.2015.7443669
- [4] Jiang, W., Li, X., Qin, W., Ge, J., & Tan, Q. (2022). "Approach of Frequency Doubling Digital Modulation Signal Generation Based on Optical Modulation Switch". Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), pp. 990-995. DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792947
- [5] Zybo Z7 Board Reference Manual, 2018
- [6] Jiang, W., Li, X., Qin, W., Ge, J., & Tan, Q. (2022). "Approach of Frequency Doubling Digital Modulation Signal Generation Based on Optical Modulation Switch". Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), pp. 990-995. DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792947
- [7] Al-Safi, A., & Bazuin, B. (2016). "FPGA Based Implementation of BPSK and QPSK Modulators Using Address Reverse Accumulators". IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), pp. 1-6. DOI: 10.1109/UEMCON.2016.7777808
- [8] Mangala J., Manikandan J., "FPGA Implementation of Reconfigurable Modulation System", 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), pp. 493-500, 2015.
- [9] H. Dhabhai, R. P. Gupta, "A Performance Analysis of Digital Modulation Techniques under Simulation Environment", 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP), pp. 1537-1541, 2015.