Otoenkoder Tabanlı Kablosuz Haberleşme Sistemi Tasarımı

Ömer Süha Aydoğdu, Bekir Levent Avan, Özgür Ertuğ
Gazi Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ankara
omersuhaa@gmail.com, bekir.avann@gmail.com, ertug@gazi.edu.tr

Özet

Klasik haberleşme sistemlerindeki ayrı modülasyon ve ekolayzır bloklarının yerine geçen uçtan uca otoenkoder tabanlı fiziksel katman tasarımları, yeni nesil haberleşme ağları için esnek çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada, kanal hafızasına duyarlı yapay zeka mimarileri kullanılarak bir haberleşme sistemi geliştirilmiştir. Hafızasız AWGN kanalı için Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), kısa yankılı 3-sekme (tap) sönümlemeli kanal için Conv1D ve ağır semboller arası girişimin (ISI) olduğu 7-sekmeli kanal için Transformer tabanlı modeller eğitilmiştir. Sonuçlar, yapay zeka tabanlı sistemlerin klasik QPSK alıcılarına benzer Bit Hata Oranı (BER) başarımına ulaştığını ve CVSD algoritmasıyla gerçek zamanlı ses iletiminde başarılı olduğunu göstermiştir.

Abstract

End-to-end autoencoder-based physical-layer designs, which replace classical modulation and equaliser blocks, offer flexible solutions for next-generation communication networks. In this study, a communication system is implemented using channel-memory-aware artificial intelligence architectures. A Multi-Layer Perceptron (MLP) for the memoryless AWGN channel, a Conv1D model for the short-delay 3-tap dispersive channel, and a Transformer-based architecture for the 7-tap channel with severe inter-symbol interference (ISI) were trained. Results demonstrate that AI-based systems achieve Bit Error Rate (BER) performance comparable to classical QPSK receivers and successfully perform end-to-end audio transmission using the CVSD algorithm.

Giriş

Geleneksel haberleşme sistemleri; kanal kodlama, modülasyon, senkronizasyon, kanal kestirimi ve ekolayzır gibi ayrı ayrı tasarlanan bloklardan oluşmaktadır. Bu yaklaşım yorumlanabilir ve güvenilir olmakla birlikte, güçlü frekans seçiciliği ve uzun gecikme yayılımı koşullarında alıcı tasarımı kanal modeline, kestirim doğruluğuna ve uyarlama parametrelerine daha duyarlı hâle gelmektedir.

O'Shea ve Hoydis, iletişim sisteminin bir otoenkoder olarak ele alınmasının verici ve alıcı bileşenlerini tek bir uçtan uca yeniden yapılandırma amacı altında ortak biçimde optimize etmeye olanak verdiğini göstermiştir [1]. Bu yaklaşımın yalnızca sayısal benzetimle sınırlı olmadığı; öğrenilmiş bir alıcı-verici zincirinin senkronize olmayan yazılım tanımlı radyolar üzerinden havadan iletimde de uygulanabildiği literatürde gösterilmiştir [3].

Bu çalışmanın temel katkısı, tüm kanal koşulları için tek bir ağ kullanmak yerine kanal hafızasına duyarlı bir mimari seçimi önermesidir. Hafızasız AWGN için Dense/MLP, kısa hafızalı 3-sekmeli yayılımlı kanal için Conv1D ve daha uzun hafızalı 7-sekmeli kanal için Transformer tabanlı alıcı kullanılmış; sonuçlar klasik QPSK zinciriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca sistemin sürekli veri akışındaki uygulanabilirliği, GNU Radio üzerinde CVSD tabanlı ses iletimiyle incelenmiştir.

Önerilen Sistem Modeli ve Yöntem

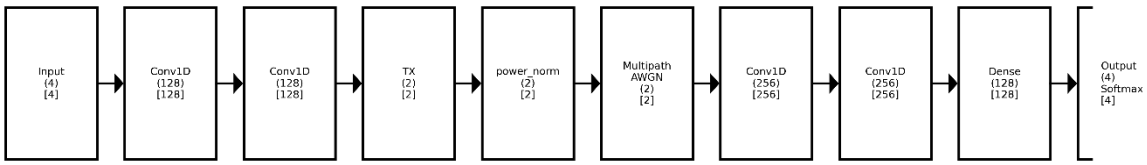
Sistemde M=4 mesaj kümesi kullanılmış ve her mesaj verici ağ tarafından iki boyutlu I/Q sembollerine dönüştürülmüştür. Kanal çıkışı alıcı ağa verilmiş ve alıcı, gönderilen mesaj sınıfını kestirecek biçimde eğitilmiştir. L-sekmeli kompleks taban bant kanal modeli (1) ile ifade edilmiştir:

$$y[k] = \sum_{l=0}^{L-1} h_l x[k-l] + n[k] \quad (1)$$

Burada toplam ℓ=0,…,L−1 aralığında alınmakta; hℓ kanal katsayılarını, x[k] gönderilen sembolleri ve n[k] kompleks Gauss gürültüsünü göstermektedir. AWGN için L=1, yayılımlı kanallar için ise sırasıyla L=3 ve L=7 seçilmiştir.

AWGN kanalı: Kanal hafızasız olduğundan, sembol kararları için Dense katmanlardan oluşan bir MLP alıcı kullanılmıştır. Bu yapı, zamansal bağlam gerektirmeyen örnekler için düşük karmaşıklıklı bir başlangıç modeli sağlamaktadır.

3-sekmeli yayılımlı kanal: Kısa süreli yankıların oluşturduğu yerel ISI örüntülerini yakalamak amacıyla alıcı tarafında Conv1D katmanları kullanılmıştır. Kayan evrişim çekirdekleri, komşu semboller arasındaki yerel bağımlılıkların öğrenilmesini sağlamaktadır.



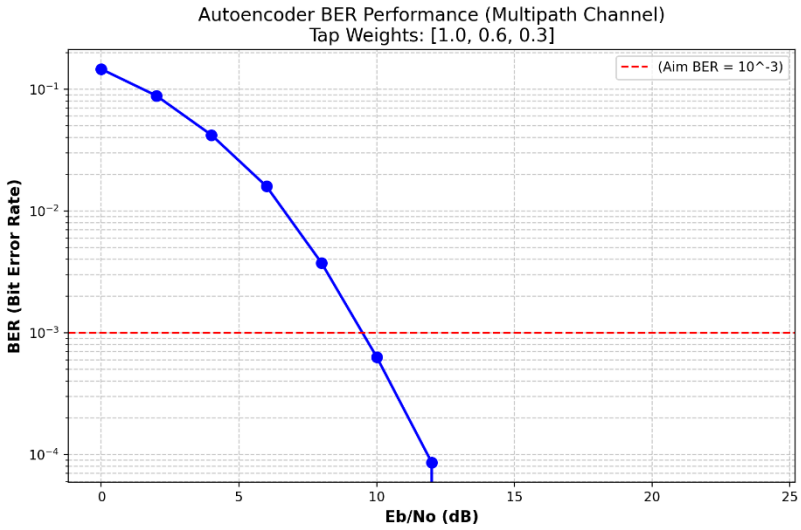
Şekil 1. 3-Sekmeli sönümlemeli kanalda Conv1D otoenkoder sistem blok modeli.

7-sekmeli yayılımlı kanal: Daha uzun kanal hafızasında semboller arası etkileşimi geniş bir bağlam üzerinden modellemek için öz-dikkat mekanizmalı Transformer alıcı tercih edilmiştir. Transformer mimarisi, yineleme veya evrişime zorunlu olmadan dikkat mekanizmalarıyla dizi bağımlılıklarını paralel olarak işleyebilmektedir [2].

Modeller Python ortamında TensorFlow/Keras kullanılarak eğitilmiş ve BER performansı aynı Eb/N0 noktalarında çalışan klasik QPSK zinciriyle karşılaştırılmıştır. Yazılım tabanlı uygulama doğrulamasında giriş sesi 8 kat örnek genişletme kullanan CVSD kodlayıcıyla ikili akışa çevrilmiş, haberleşme zincirinden geçirilmiş ve alıcı uçta yeniden oluşturulmuştur.

Simülasyon Bulguları ve Pratik Doğrulama

Eğitilen modellerin BER–E_b/N_0 eğrileri incelendiğinde, Dense otoenkoderin AWGN kanalında klasik QPSK referansına yakın bir başarım eğilimi sergilediği görülmüştür. Conv1D tabanlı alıcı ise 3-sekmeli yayılımlı kanalda yerel ISI etkilerini öğrenerek hedef BER düzeyine ulaşmıştır. Daha uzun kanal hafızasına sahip 7-sekmeli yayılımlı kanalda Transformer alıcı, geniş zamansal bağlamı kullanarak semboller arası bağımlılıkların modellenmesini sağlamıştır.



Şekil 2. 3-sekmeli yayılımlı çok yollu kanalda Conv1D otoenkoder başarım grafiği.

CVSD tabanlı ses deneyinde alıcı uçta anlaşılabilir sesin yeniden elde edilmesi, sistemin yalnızca rastgele bit dizilerinde değil, sürekli bir kaynak akışında da çalışabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte bu doğrulama,

havadan RF iletiminden ziyade GNU Radio üzerindeki yazılım zincirini değerlendirmektedir; gerçek kanal, frekans/zaman senkronizasyonu ve donanım bozunumları sonraki çalışma aşamasında ayrıca ele alınmalıdır.

Sistem	Algoritma	E_b/N_0 (dB)
AWGN	**Dense**	**7**
3-Sekmeli Yayılımlı	**Conv1D**	**9**
7-Sekmeli Yayılımlı	**Transformer**	**9**

Tablo 1. Farklı sistemlerin BER (10^{-3}) hedefine ulaşma Eb/No'ları

Tablo 1'deki sonuçlar, kanal hafızası ve ISI etkisi arttıkça hedef hata oranına ulaşmak için daha yüksek E_b/N_0 ve daha gelişmiş alıcı mimarilerinin gerektiğini göstermektedir. 3-sekmeli dispersif kanal için verilen yaklaşık 9 dB değeri Şekil 2'deki mevcut eğriden okunmuştur; nihai eşik değeri ham simülasyon çıktıları üzerinden doğrulanmalıdır.

Sonuç

Bu çalışmada, kanalın hafıza özelliğine göre ölçeklenen otoenkoder tabanlı bir fiziksel katman yaklaşımı sunulmuştur. Hafızasız kanalda MLP, kısa hafızalı kanalda Conv1D ve daha uzun hafızalı kanalda Transformer kullanılması; tek bir mimarinin tüm kanal koşullarına uygulanmasından daha fiziksel ve yorumlanabilir bir tasarım çerçevesi oluşturmuştur. GNU Radio üzerindeki CVSD deneyi de öğrenilmiş zincirin sürekli ses verisiyle çalışabildiğini göstermiştir. Gerçekçi zaman ve frekans seçici OFDM kanallarında öğrenilmiş alıcıların pilot yükünü BER kaybı olmadan azaltabildiği raporlanmıştır [4]. Bu nedenle gelecek çalışmada sistemin OFDM, gerçek SDR bağlantısı, senkronizasyon hataları ve donanımın doğrusal olmayanlıkları altında sınanması planlanmaktadır.

Kaynaklar

[1] O'Shea T. J. ve Hoydis J., "An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer", IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, cilt.3 no.4, s.563-575, 2017.
[2] Vaswani A. ve arkadaşları, "Attention Is All You Need", Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), cilt.30, 2017.
[3] Dörner S., Cammerer S., Hoydis J. ve ten Brink S., "Deep Learning-Based Communication Over the Air", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, cilt.12 no.1, s.132-143, 2018.
[4] Aoudia F. A. ve Hoydis J., "End-to-End Learning for OFDM: From Neural Receivers to Pilotless Communication", IEEE Transactions on Wireless Communications, cilt.21 no.2, s.1049-1063, 2022.