

# Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemlerinde Turbo Çarpım Kodların Performans Analizi

## Performance Analysis of Turbo Product Codes on Free Space Optics Communication Systems

Mert Bayraktar 

Hasan Kalyoncu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gaziantep, Türkiye  
mert.bayraktar@hku.edu.tr

### Öz

Bu makalede, turbo çarpım kodlarının(TPC) serbest uzay optik(FSO) sistemlerinin performansına olan etkisi incelenmiştir. Atmosfer modeli olarak log-normal dağılım seçilmiştir. MATLAB benzetim çalışmaları zayıf ve orta türbülansta gerçekleştirilmiştir. Turbo çarpım kodlarını oluşturan kod bileşenleri, genişletilmiş hamming ve genişletilmiş Bose–Chaudhuri–Hocquenghem(BCH) kodları olarak kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre, özellikle ortatürbülans altında TPC kullanımı ile hedeflenen bit hata oranına(bit error rate(BER))ulaşırken 15dB'ye kadar kod kazancı sağlanabilmektedir. Bu kod kazancı BCH tabanlı TPC kullanılırsa daha fazla iken hamming tabanlı TPC kullanılırsa daha az olmaktadır. Düşük kod oranlı ve BCH kod bileşeni ile oluşturulan TPC ile 0dB sinyal-gürültü oranı(signal to noise ratio(SNR)) değerinde bile sistemin BER'i  $10^{-5}$ 'e düşebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Turbo çarpım kodu, serbest uzay optik, bit hata oranı, atmosferik türbülans.

### Abstract

In this article, the effect of turbo product codes(TPC) over the performance of free space optics systems is analyzed. Log-normal distribution is selected as the turbulence model. MATLAB simulations are carried out in weak and moderate turbulence. Component codes which construct turbo product codes are used as extended hamming and extended Bose–Chaudhuri–Hocquenghem(BCH) codes. According to simulation results, it can be provided that up to 15dB code gain to reach the target bit error rate(BER) with the use of TPC especially under moderate turbulence. While this code gain is more if BCH based TPC is used, it becomes less if hamming based TPC is used. With low code rate and TPC which is constructed with BCH code component, BER of system can decrease to  $10^{-5}$  even in 0dB signal to noise ratio(SNR).

Keywords: Turbo product code, free space optic, bit error rate, atmospheric turbulence.

### 1. Giriş

İleri hata düzeltme (Forward error correction (FEC)) kodları bit hata oranını düşürmek için kablosuz haberleşme sistemlerinde oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Bu doğrultuda, Elias çarpım(product) kodlarını bilim dünyasına ilk tanıtan ilk bilim insanı olmuştur[1]. Daha sonra ise Turbo kodlar bilim dünyamıza girmiş ve oldukça sık kullanılmıştır[2]. Bu bilgilerin ışığında Turbo çarpım kodları[3]'de tanıtılmış ve Shannon kanal kapasitesine yakın sonuçlar sağladığı gösterilmiştir. TPC'nin basit kodlama ve çözümlene özellikleri [4]'te vurgulanmıştır. [5]'te yüksek kod oranlarında TPC'nin yüksek kod kazancı sağladığı vurgulanmıştır. Ayrıca TPC'ler yüksek bit oranı ihtiyacı olan sistemlerde düşük gecikme sağlamaktadır [6]. Yüksek bit oranı sağlayan sistemlerden biri de fiber optik haberleşme sistemleridir. Bu doğrultuda, TPC fiber haberleşme sistemlerine de uygulanmış ve sonuçları bilim dünyası ile paylaşılmıştır. 10Gbps bit oranında çalışan bir fiber optik haberleşme sistemine TPC uygulanmış ve kod kazancı 10 dB olarak gözlemlenmiştir [7]. Bir başka çalışmada ise BCH tabanlı TPC kullanarak 100Gbps bit oranında fiber optik haberleşme sisteminde ölçümler yapılmış ve hedef BER  $10^{-15}$  değerinde kod kazancı 10 dB çıkmıştır[8]. Bu özelliklerini göz önünde bulundurarak, IEEE TPC'nin kullanılmasını bazı haberleşme sistemlerinde standartlaştırmıştır. TPC'ler güç hattı ağlarının haberleşme standardı olan IEEE-1901 nolu standartta yerini almıştır [9]. Bunun yanında mobil geniş bant kablosuz erişim(MBWA) standardı [10] olan IEEE 802.20'de ve WiMAX standardı[11] olan IEEE 802.16'da yerini almıştır.

Serbest uzay optik teknolojisi atmosfer üzerinden yüksek bant genişliğinde veri ileten optik bir haberleşme sistemidir. 5G ile birlikte artan düşük gecikme ihtiyacı ile tekrar popüler olması öngörülmektedir. Ancak haberleşme kanalı atmosfer olduğundan, sistem performansı atmosfere doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, bilim insanları FSO sistemlerinin performansını iyileştirmek üzere çalışmalar yapmaktadır. FEC uygulamaları da bunlardan bir tanesidir. Yazarlar, BCH

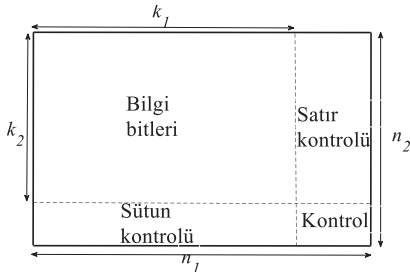
kod ile 10km'ye kadar kablosuz optik link kurmuşlardır [12]. Gamma-gamma dağılımlı zayıf türbülans şartlarında, düşük yoğunluklu benzerlik kontrolü(Low density parity check(LDPC)) kodları kullanarak yapılan deneyde ise  $10^{-6}$  BER değerinde 1.8dB SNR kazancı sağlanmıştır[13]. Aynı kod çeşidi ile FPGA tabanlı yapılan deneysel bir çalışma da gösteriyor ki yüksek kod oranları ile düşük SNR değerlerinde  $10^{-8}$ 'in altında BER değerlerine ulaşılabilmektedir[14]. Son yıllarda trend olan polar kodların FSO'ya uygulanması ile LDPC koda ek olarak 1.6dB net kod kazancı sağladığı görülmüştür [15].

Bu çalışmanın amacı, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde kanal kodlama yaparak daha düşük bit hata oranı elde etmektir. Bu amaç doğrultusunda turbo çarpım kodları kullanılmıştır. TPC'nin satır ve sütunların da genişletilmiş BCH ve genişletilmiş hamming kodlar olmak üzere iki farklı kod türü kullanılmış ve bunların performans etkisi gözlemlenmiştir. Atmosfer modeli olarak log-normal dağılıma sahip atmosfer modeli seçilmiştir. Deneyler, zayıf ve orta şiddetli türbülans olmak üzere iki farklı şart altında yapılmış ve bit hata oranları karşılaştırılmıştır.

## 2. Sistem Yapısı

### 2.1. TPC Yapısı

2 boyutlu turbo çarpım kodları  $C^j$  ( $j = 1, 2$ ) bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenler BCH [16], hamming[17], Reed-solomon [18] veya diğer kodlardan seçilebilir.  $C^j$  kod bileşenleri  $(n_j, k_j)$  şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $k_j$  bilgi bitlerinin sayısını ve  $n_j$  kod kelimesi uzunluğunu göstermektedir. TPC kodlama sırasında bilgi bitleri şekil 1'de görüldüğü üzere  $k_1 \times k_2$  matrisi şeklinde yerleştirilir.



Şekil 1: Turbo çarpım kodunun iki boyutlu görüntüsü

Daha sonra sırayla aşağıdaki basamaklar gerçekleştirilir[19]:

- $k_1$  tane satır,  $C^1$  kodu ile kodlanır ve  $k_1 \times n_1$  boyutlu matris elde edilir.
- Bu matristeki  $n_1$  tane sütun,  $C^2$  kodu ile kodlanır ve  $n_2 \times n_1$  boyutlu matris elde edilir.

Bu işlemlerin sonucunda elde edilen kod kelimesinin özellikleri  $(n_1 \times n_2, k_1 \times k_2)$  şeklinde gösterilmekte olup kod oranı ise  $(k_1 \times k_2)/(n_1 \times n_2)$  şeklinde hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada TPC'yi oluşturan kod bileşenleri genişletilmiş hamming ve genişletilmiş BCH kodları olarak seçilmiştir. Kullanılan kodların kod parametreleri tablo 1'de verilmiştir. Simetrik TPC kullanıldığından yani  $n_1 = n_2$  ve  $k_1 = k_2$  olduğundan TPC kodları  $(n_{1,2}, k_{1,2})^2$  ile ifade edilmektedir.

Tablo 1: Kullanılan kod çifti değerleri

Genişletilmiş hamming		Genişletilmiş BCH	
Kod parametreleri	Kod oranı	Kod parametreleri	Kod oranı
$(8, 4)^2$	0.25	-	-
$(16, 11)^2$	0.47	$(16, 7)^2$	0.19
$(32, 26)^2$	0.66	$(32, 21)^2$	0.43
$(64, 57)^2$	0.79	$(64, 51)^2$	0.63

TPC çözümleyici olarak ise MATLAB'ın da sağlamış olduğu yumuşak girdi yumuşak çıktı (soft inputsoft output (SISO)) tipi çözümleyici kullanılmıştır. Bu çalışmada, çözümleyicideki tekrarlar sayısı 3 olarak alınmıştır. Bunun sebebi ise tekrarlar sayısı 3'ten sonra çözümleyicideki bit hata oranında çok büyük bir değişiklik olmamasıdır [3].

### 2.2. Kanal Modeli

FSO sistemlerinde haberleşme kanalı atmosferdir. Bu nedenle atmosferik türbülansın direkt olarak etkilenirler. Bu çalışmada genellikle zayıf-orta türbülansta geçerli olan log-normal dağılımlı atmosferik türbülans kullanılmıştır. Kullanılan atmosferik türbülansın yapısı için log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonu(pdf)[20] log parıldama varyansı kullanarak

$$p(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \exp\left(-\frac{(\ln(I/I_0) - E[I])^2}{2\sigma_I^2}\right) \quad (1)$$

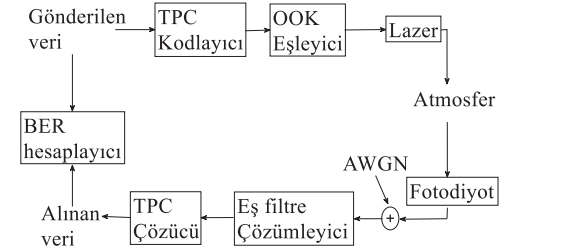
şeklinde verilmektedir. Denklem 1'de  $E[I]$ ,  $I$ 'nin beklenen değeri ve düzlemsel dalga için log parıldama varyansı

$$\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

Denklem 2'de,  $L$  haberleşme mesafesini,  $k$  dalga sayısını ve  $C_n^2$  türbülans şiddetini belirten kırınım indisi yapı sabitini temsil etmektedir.

Denklem 1 ve 2 kullanılarak MATLAB'da benzetim ortamı oluşturulmuştur. Bu benzetim çalışmalarında haberleşme mesafesi sabit 5km olarak alınmış, türbülansın şiddeti ise iki farklı şekilde zayıf türbülans  $C_n^2 = 10^{-16} m^{-2/3}$  ve orta türbülans  $C_n^2 = 10^{-14} m^{-2/3}$  olarak seçilmiştir.  $C_n^2$ , kırınım indisi yapı sabitidir ve atmosferik türbülansın şiddetini belirlemede kullanılır. Kullanılan deney düzeneğinin örnek

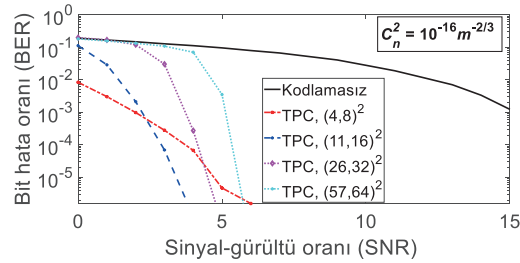
blok şeması şekil 2’de görülmektedir. Bu şekilde gösterilen AWGN eklenebilir beyaz Gauss gürültüsünü(additive white Gaussian noise) temsil etmektedir.



Şekil 2: Tasarlanan optik haberleşme sisteminin blok şeması

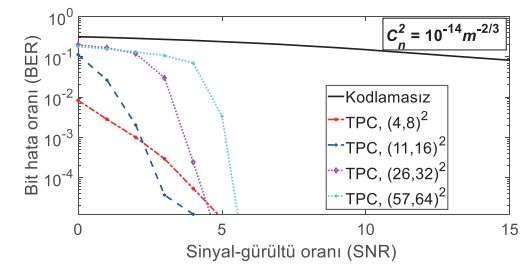
### 3. Benzetim Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde MATLAB ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 3 ve 4’te genişletilmiş hamming kod bileşeninden yaratılan turbo çarpım kodlarının zayıf ve orta şiddetli türbülansa BER performansı görülmektedir. Şekil 3 ve 4’ten görüldüğü üzere, düşük kod oranı ile düşük SNR değerlerinde daha fazla kazanç elde etmek mümkündür. SNR değeri 6dB’nin üzerine çıktığında ise daha daha yüksek kod oranına sahip kod çiftleri daha fazla avantaj sağlamaktadır.



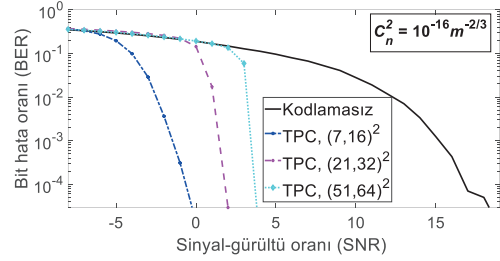
Şekil 3: Zayıf türbülans genişletilmiş hamming kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 3 ve 4’ü karşılaştırdığımızda ise TPC’nin türbülans şiddetinin artması ile daha fazla avantaj sağladığı göze çarpmaktadır. Kod oranı arttığında bile TPC, gösterilen SNR bölgesi içerisinde özellikle orta şiddetli türbülansa  $10^{-3}$  kadar düşük bit hata oranı sağlayabilmektedir.



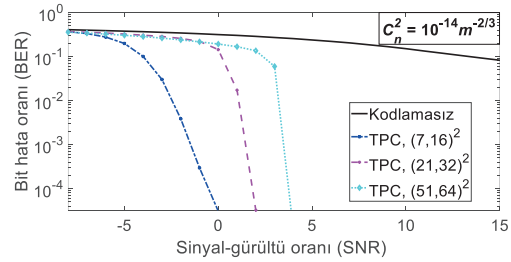
Şekil 4: Orta türbülansa genişletilmiş hamming kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 5 ve 6’da TPC kod bileşeni olarak BCH kod kullanıldığında FSO sisteminin BER performansı görülmektedir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, düşük kod oranlı TPC kullanıldığında  $10^{-5}$  hedef BER değerine ulaşırken yaklaşık 16dB kod kazancı sağlanmaktadır. En yüksek kod oranlı TPC  $(64,51)^2$  kullanıldığında kod kazancı yaklaşık 12dB olmaktadır.



Şekil 5: Zayıf türbülansa genişletilmiş BCH kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 6’a baktığımızda ise orta türbülansa kullanılacak kod oranına göre yaklaşık 4dB SNR değeri ile en az  $10^{-5}$  BER değerine ulaşmak mümkün olduğu görülmektedir.



Şekil 6: Orta türbülansa genişletilmiş BCH kod tabanlı TPC’nin BER performansı.

Şekil 3 il 5 ve 4 ile 6 kendi içlerinde karşılaştırıldığında ise TPC’nin kod bileşeni olarak genişletilmiş hamming ve genişletilmiş BCH kullanıldığında sistem performansının nasıl etkilendiğini görmekteyiz. Bu karşılaştırmalar gösteriyor ki, kod bileşeni olarak genişletilmiş BCH kullanıldığında hedef BER değerine ulaşmak için daha düşük SNR değeri yeterli olacaktır. Bir başka deyişle, genişletilmiş BCH kod kullanıldığında kod kazancı daha yüksek olmaktadır. Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında ise turbo çarpım kodlarının avantajının türbülans şiddeti arttıkça ortaya çıktığı sonucuna varılmaktadır.

### 4. Sonuç

Bu makalede FSO sistemlerinde TPC kullanıldığında BER performansı analiz edilmiştir. MATLAB ortamında yapılan benzetimler ışığında TPC kullanımı ile hedef BER değerine ulaşırken 15dB kod kazancı sağlanabileceği görülmektedir. FSO sistemleri atmosferden çok etkilenmelerine rağmen, TPC kullanımı ile bu etkinin azaltılabileceği sonucu çıkarılmıştır. Özellikle türbülans şiddeti arttıkça genişletilmiş hamming kod bileşeninden oluşan TPC ile bit hata oranı

düşürebilir ve sistemin çökmesi engellebilir. Bu çalışmanın sonuçlarının FSO sistem tasarımcılarına yol göstereceği düşünülmektedir.

### Kaynaklar

- [1] P. Elias, "Error-Free Coding," *Trans. IRE Prof. Group Inf. Theory*, vol. 4, no. 4, pp. 29-37, 1954.
- [2] C. Berrou and A. Glavieux, "Near Optimum Error Correcting Coding And Decoding: Turbo-Codes," *IEEE Transactions On Communication*, vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, 1996.
- [3] R. M. Pyndiah, "Near-Optimum Decoding of Product Codes: Block Turbo Codes," *IEEE Transactions On Communications*, vol. 46, no. 8, pp. 1003-1010, 1998.
- [4] J. Li, E. Kurtas, K. R. Narayanan, and C. N. Georghiadis, "On the Performance of Turbo Product Codes over Partial Response Channels," *37*, no. 4, pp. 1932-1934, 2001.
- [5] C. Argon and S. W. McLaughlin, "Optical OOK-CDMA and PPM-CDMA systems with turbo product codes," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 9, pp. 1653-1663, 2002.
- [6] S. Lingyan, S. Hongwei, Z. Keirn, and B. V. K. V. Kumar, "Field programmable gate array (FPGA) for iterative code evaluation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 2, pp. 226-231, 2006.
- [7] T. Mizuochi et al., "Forward Error Correction Based on Block Turbo Code With 3-Bit Soft Decision for 10-Gb/s Optical Communication Systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, no. 2, pp. 376-386, 2004.
- [8] Y. Miyata, K. Kubo, K. Onohara, W. Matsumoto, H. Yoshida, and T. Mizuochi, "UEP-BCH Product Code based Hard-Decision FEC for 100 Gb/s Optical Transport Networks," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Expo. Nat. Fiber Opt. Eng. Conf.*, Los Angeles, CA, USA, 2012, pp. 1-3.
- [9] IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, 2010.
- [10] Air Interface for Mobile Broadband Wireless Access Systems Supporting Vehicular Mobility— Physical and Media Access Control Layer Specification, 2008.
- [11] Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, 2009.
- [12] H. R. Khodadadi, M. H. Ghezel Ayagh, and A. Chaman Motlagh, "Analysis of link availability and capacity in multiple-input/single-output-Bose–Chaudhuri–Hocquenghem FSO systems under various turbulence conditions with pointing errors," *IET Communications*, vol. 11, no. 8, pp. 1305-1312, 2017.
- [13] L. Wang, R. Gao, X. Chen, Q. Xu, and Y. Tang, "QC-LPDC Code modulation with probabilistic shaping for atmospheric turbulence channel," *Optics Communications*, vol. 453, 2019.
- [14] X. Sun, D. Zou, Z. Qu, and I. B. Djordjevic, "Run-time reconfigurable adaptive LDPC coding for optical channels," *Opt Express*, vol. 26, no. 22, pp. 29319-29329, Oct 29 2018.
- [15] J. Fang et al., "Polar-Coded MIMO FSO Communication System Over Gamma-Gamma Turbulence Channel With Spatially Correlated Fading," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 11, 2018.
- [16] S. Hirasawa, M. Kasahara, Y. Sugiyama, and T. Namekawa, "Modified Product Codes," *IEEE Transactions On Information Theory*, vol. 30, no. 2, pp. 299-306, 1984.
- [17] X. Changlong, L. Ying-Chang, and L. Wing Seng, "Shortened Turbo Product Codes: Encoding Design and Decoding Algorithm," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, pp. 3495-3501, 2007.
- [18] Y. Wang, Y. Du, S. Yu, and K. T. Chan, "An Adaptive UEP BTC STBC OFDM System for Robust Video Transmission," presented at the 2005 IEEE 7th Workshop on Multimedia Signal Processing, USA, 2005.
- [19] H. Mukhtar, A. Al-Dweik, and A. Shami, "Turbo Product Codes: Applications, Challenges, and Future Directions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 3052-3069, 2016.
- [20] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandar, *Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB*. CRC Press, 2012, p. 575.

## Mert BAYRAKTAR



Mert Bayraktar, elektronik ve haberleşme mühendisliği lisans derecesini 2013 yılında Çankaya Üniversitesinden almıştır. Aynı zamanda bilgisayar mühendisliği bölümünde çift anadal yapmıştır. Yüksek lisansını aynı üniversitede 2013 yılında serbest uzay optik sistemler üzerine yazdığı tez ile tamamlamıştır. Bayraktar, doktora derecesini aynı üniversitede 2015 yılında almıştır. Çalışma alanları arasında kablosuz iletişim, optik iletişim, görünür ışık haberleşmesi ve kanal kodlama yer almaktadır. Teknogirişim sermaye desteği ile serbest uzay optik ve görünür ışık haberleşme sistemlerinin prototipini tamamlamıştır. 5 adet SCI yayını bulunmaktadır. Halen Hasan Kalyoncu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.