

ANALYSIS OF ANTI-JAMMING CAPABILITY IN DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS USING TURBO CHANNEL CODING

Do Manh Hung

Weapon Institute - Vietnam Defence Industry

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 02/12/2025 Revised: 03/02/2026 Published: 08/02/2026	This study focuses on evaluating the impact of various types of interference on a digital communication system when transmitting different forms of data, including binary sequences, text messages, and images. The transmitted data is encoded using the Turbo channel coding scheme to enhance robustness against noise and jamming. Three interference types are considered: wideband noise, narrowband noise, and burst noise, which represent common jamming techniques in electronic warfare. The entire simulation process—including modulation, transmission, encoding, noise injection, and decoding—is implemented in MATLAB to assess bit-error performance under different signal-to-noise ratios and interference conditions. Simulation results show that the system's performance is significantly affected by the presence of interference. In the absence of jamming, Turbo coding achieves very low bit-error rates and maintains stable performance due to its iterative decoding mechanism, which effectively recovers corrupted bits. When subjected to wideband, narrowband, or burst noise, the bit-error rate increases notably, especially at low signal-to-noise ratio. Wideband interference degrades the entire coded sequence uniformly, whereas narrowband and burst interference introduce localized error clusters, sharply increasing the probability of bit errors. Nevertheless, Turbo coding demonstrates strong error-correction capability thanks to its code redundancy and iterative decoding, allowing the bit-error rate to decrease rapidly as the SNR improves. Overall, the simulations indicate that Turbo coding maintains stable performance and ensures reliable data transmission even under different types of interference.
KEYWORDS Digital communication systems Barrage noise Partial-band jamming Bit error rate Signal to noise ratio	

NGHIÊN CỨU, ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỐNG NHIỄU CỦA CÁC ĐƯỜNG THÔNG TIN SỐ SỬ DỤNG MÃ HÓA TURBO

Đỗ Mạnh Hùng

Viện Vũ khí - Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 02/12/2025 Ngày hoàn thiện: 03/02/2026 Ngày đăng: 08/02/2026	Nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của các dạng nhiễu lên hệ thống thông tin số khi truyền nhiều kiểu dữ liệu khác nhau, bao gồm bản tin văn bản và ảnh. Dữ liệu được mã hóa bằng hai kỹ thuật mã hóa kênh Turbo để nâng cao khả năng chống nhiễu. Ba dạng nhiễu được xem xét bao gồm: nhiễu băng rộng, băng hẹp và nhiễu xung, đây là ba dạng nhiễu cơ bản được sử dụng trong tác chiến điện tử. Toàn bộ quy trình mô phỏng, điều chế, truyền tin, mã hóa, thêm nhiễu và giải mã được triển khai trên MATLAB để đánh giá hiệu năng lỗi bit theo từng mức tín/tap và từng loại nhiễu. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu năng của hệ thống chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi sự xuất hiện của nhiễu. Trong trường hợp không bị gây nhiễu, mã Turbo cho tỉ lệ lỗi bit rất thấp và duy trì độ ổn định tốt, nhờ cơ chế giải mã lặp giúp phục hồi chính xác chuỗi bit. Khi hệ thống chịu tác động của các dạng gây nhiễu như gây nhiễu băng rộng, băng hẹp hoặc gây nhiễu xung, tỉ lệ lỗi bit tăng lên đáng kể, đặc biệt tại các mức tín/tap thấp. Gây nhiễu băng rộng làm suy giảm đồng đều toàn bộ chuỗi mã, trong khi gây nhiễu băng hẹp và nhiễu xung tạo ra các đoạn lỗi cục bộ làm tăng mạnh xác suất bit sai. Tuy nhiên, mã Turbo vẫn thể hiện khả năng sửa lỗi tốt nhờ tính dư thừa của chuỗi mã và thuật toán giải mã lặp, giúp tỉ lệ lỗi bit giảm nhanh khi tín/tap tăng. Tổng thể, mô phỏng cho thấy mã Turbo duy trì hiệu năng khá ổn định và vẫn đảm bảo độ tin cậy truyền dẫn ngay cả khi hệ thống bị tác động bởi các dạng nhiễu khác nhau.
TỪ KHÓA Hệ thống thông tin số Nhiễu băng rộng Nhiễu băng hẹp Tỉ lệ lỗi bit Tỉ số tín/tap	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14138>

Email: manhhungdo15485@gmail.com

<http://jst.tnu.edu.vn>

157

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu chung

Trong bối cảnh các hệ thống thông tin số ngày càng được ứng dụng sâu rộng trong an ninh quốc phòng, hàng không, vệ tinh, định vị và hạ tầng viễn thông dân sự, yêu cầu duy trì chất lượng truyền dẫn ổn định trong môi trường có nhiễu ngày càng trở nên cấp thiết. Các hệ thống này phải hoạt động trong điều kiện tín hiệu suy hao, chịu ảnh hưởng của đa đường, fading, cũng như nhiều dạng gây nhiễu chủ động của đối phương trong môi trường tác chiến điện tử phức tạp. Các kỹ thuật gây nhiễu phổ biến bao gồm gây nhiễu băng rộng, gây nhiễu băng hẹp và gây nhiễu xung, trong đó mỗi dạng đều có đặc tính tác động khác nhau lên kênh truyền và khả năng làm suy giảm đáng kể tỉ lệ tín/tạp (SNR) [1], [2]. Những loại nhiễu này có thể khiến tỉ lệ lỗi bit (BER) tăng đột biến, làm giảm hiệu quả truyền dẫn và trong nhiều trường hợp có thể gây gián đoạn hoàn toàn đường thông tin gây khó khăn trong chỉ huy, điều hành tác chiến.

Để nâng cao độ tin cậy và đảm bảo khả năng duy trì liên lạc cũng như khả năng chống nhiễu trong môi trường tác chiến điện tử, các kỹ thuật mã hóa kênh (FEC – Forward Error Correction) đóng vai trò quan trọng. FEC cho phép bổ sung dư thừa có kiểm soát vào dữ liệu gốc để phía thu có thể phát hiện và sửa lỗi mà không cần gửi lại bản tin. Trong số nhiều phương pháp mã hóa hiện đại, mã Turbo là một trong những kỹ thuật có hiệu năng cao, nổi bật nhờ cơ chế mã hóa dạng nối tiếp và quá trình giải mã lặp dựa trên thuật toán MAP, có khả năng tiến gần giới hạn Shannon [3], [4]. Từ khi được giới thiệu vào đầu những năm 1990, Turbo code đã được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống viễn thông, truyền hình số, hệ thống thông tin vệ tinh và nhiều tiêu chuẩn truyền thông không dây [5], [6].

Mặc dù Turbo code đã được nghiên cứu rộng rãi trong các môi trường kênh truyền có nhiễu Gaussian và fading truyền thống, số lượng công trình tập trung vào khả năng chống nhiễu chủ động (jamming) còn tương đối hạn chế. Một số nghiên cứu kinh điển chủ yếu mô phỏng hiệu năng của mã Turbo trong kênh AWGN hoặc Rayleigh mà không xét đến các dạng gây nhiễu điện tử. Chẳng hạn, Berrou và cộng sự [3] và Hagenauer [4] phân tích hiệu năng giải mã lặp của Turbo code nhưng chỉ trong điều kiện nhiễu Gauss. Các nghiên cứu khác tập trung vào hiệu suất Turbo code trong môi trường fading như Rayleigh hoặc Ricean [7], [8], tuy nhiên vẫn chưa đề cập đến nhiễu có chủ đích gây suy giảm SNR đột ngột như nhiễu băng hẹp hoặc nhiễu xung.

Một số công trình liên quan đến chống nhiễu chủ động chủ yếu tập trung vào hệ thống OFDM, chuỗi trải phổ trực tiếp (DSSS) hoặc nhảy tần (FHSS) thay vì mã hóa kênh. Poisel [2] và Adamy [9] phân loại các kỹ thuật gây nhiễu nhưng không đánh giá cụ thể hiệu năng của Turbo code. Một số nghiên cứu gần đây xem xét tác động của nhiễu băng hẹp lên các hệ thống điều chế số [10], hoặc đánh giá BER dưới nhiễu xung [11], nhưng hầu hết chỉ áp dụng với dữ liệu nhị phân đơn giản và không kết hợp với mã hóa Turbo. Ngoài ra, các nghiên cứu đánh giá tác động của nhiễu loại nhiễu khác nhau lên cùng một hệ thống mã hóa kênh, đặc biệt khi truyền các dạng dữ liệu đa dạng như văn bản, ảnh hoặc tín hiệu phức tạp, vẫn còn rất ít [12], [13]. Do đó, việc xây dựng một mô hình đánh giá toàn diện khả năng chống nhiễu của hệ thống thông tin số sử dụng mã Turbo dưới các dạng gây nhiễu phổ biến trong tác chiến điện tử vẫn là một khoảng trống nghiên cứu đáng được quan tâm.

Nghiên cứu này tập trung đánh giá toàn diện khả năng chống nhiễu của các đường thông tin số sử dụng mã hóa Turbo. Ba dạng dữ liệu đại diện—chuỗi nhị phân, bản tin văn bản và ảnh—được lựa chọn nhằm phản ánh các loại thông tin thường gặp trong nhiều hệ thống thực tế. Tương ứng với đó, ba mô hình nhiễu cơ bản gồm gây nhiễu băng rộng (barrage noise), gây nhiễu băng hẹp (partial-band jamming) và gây nhiễu xung (burst noise) được xây dựng theo đúng đặc tính của nhiễu trong tác chiến điện tử [14]. Toàn bộ quá trình mô phỏng, từ mã hóa, điều chế, truyền qua kênh, chèn nhiễu và giải mã, được thực hiện trên MATLAB nhằm đánh giá sự thay đổi BER theo từng mức tín/tạp. Kết quả thu được giúp phân tích sâu mức độ suy giảm hiệu năng của hệ thống dưới từng dạng nhiễu, đồng thời cho thấy hiệu quả của mã Turbo trong việc duy trì độ tin cậy của đường truyền.

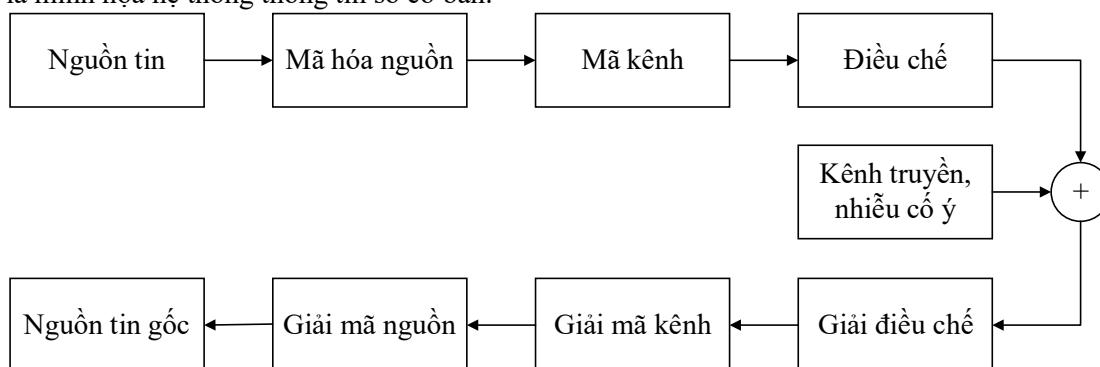
Cấu trúc nội dung tiếp theo của bài báo 3 phần chính: các cơ sở lý thuyết của hệ thống thông tin, mã Turbo và các dạng nhiễu trình bày ở phần 2. Phần 3 đánh giá khả năng chống nhiễu của hệ thống thông tin trong MATLAB. Phần 4 là kết luận tổng quan.

2. Cơ sở lý thuyết hệ thống thông tin và các dạng nhiễu

Trong phần này, bài báo tập trung trình bày cơ sở lý thuyết của hệ thống thông tin số và cấu trúc của các dạng nhiễu sử dụng để đánh giá hệ thống.

2.1. Tổng quan hệ thống thông tin số

Hệ thống thông tin số (Digital Communication System) là nền tảng của hầu hết các công nghệ truyền thông hiện đại, từ mạng viễn thông di động, truyền hình số, Wi-Fi cho đến các hệ thống radar và định vị. Mục tiêu của một hệ thống thông tin số là truyền tải dữ liệu từ nguồn phát đến đích thông qua một kênh truyền có nhiễu với độ tin cậy cao nhất và hiệu quả phổ tối ưu. Hình 1 là minh họa hệ thống thông tin số cơ bản.



Hình 1. Sơ đồ tổng quát hệ thống thông tin số

Trong hệ thống thông tin số, dữ liệu nguồn như chuỗi bit, ảnh hoặc bản tin văn bản (Hình 2) được mã hóa nguồn. Trong nghiên cứu này, tác giả thực hiện chuyển các ký tự chữ, các gam màu trong ảnh thành các ký tự 0 – 1. Ví dụ “The” trong văn bản được mã hóa thành chuỗi ký tự dạng 4x8 có dạng { '01010100'; '01101000'; '01000100'; '00100000' }. Chuỗi ký tự sau đó được mã hóa kênh bằng mã Turbo nhằm tăng khả năng chống lỗi. Chuỗi bit đã mã hóa được điều chế theo sơ đồ M-PSK để tạo tín hiệu tương tự truyền qua kênh. Trong quá trình lan truyền, tín hiệu chịu tác động của nhiễu và suy hao, làm sai lệch thông tin. Ở phía thu, tín hiệu được giải điều chế M-PSK để thu lại các bit mềm, tiếp tục đưa vào bộ giải mã Turbo nhằm khôi phục chuỗi bit ban đầu. Cuối cùng, khối giải mã nguồn tái tạo lại dữ liệu gốc, đảm bảo hệ thống truyền tin hoạt động tin cậy ngay cả trong môi trường nhiễu mạnh.

2.2. Tổng quan các dạng nhiễu

Trong phần này, tác giả chỉ đề cập đến ba dạng nhiễu có ý thông dụng thường được sử dụng để gây nhiễu các hệ thống thông tin liên lạc bao gồm có: nhiễu băng rộng, nhiễu băng hẹp và nhiễu xung.

a) Nhiễu băng rộng

Nhiễu băng rộng là nhiễu tích cực có độ rộng phổ được chọn gần tương đương với dải tần làm việc của hệ thống thông tin cần chế áp. Trong thực tế nhiễu băng rộng có độ rộng phổ lớn hơn từ hàng chục đến hàng trăm lần dải thông máy thu của hệ thống thông tin cần chế áp. Trong trường hợp này năng lượng nhiễu không được sử dụng tập trung để chế áp, do vậy hiệu quả của nhiễu băng rộng không cao.

b) Nhiều băng hẹp

Nhiều băng hẹp là nhiều tích cực có độ rộng phổ tương đương với độ rộng phổ tín hiệu của hệ thống thông tin cần chế áp. Trong thực tế độ rộng phổ nhiều băng hẹp không vượt quá 2 - 3 lần dải thông máy thu: $\Delta f_n = (2 \div 3) \Delta f_{MT}$.

Việc sử dụng nhiều băng hẹp tương đối khó khăn và phải hiệu chỉnh máy phát nhiều sao cho tần số của nó trùng với tần số làm việc của hệ thống thông tin cần chế áp. Vì các hệ thống này có khả năng thay đổi tần số rất nhanh nên trong các đài gây nhiễu băng hẹp thường có thêm hệ thống điều khiển tần số.

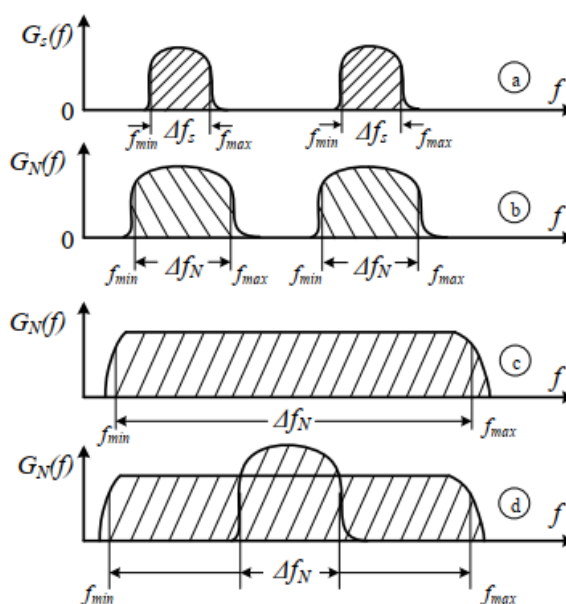
The Passive Band Pass Filter can be used to isolate or filter out certain frequencies that lie within a particular band or range of frequencies. The cut-off frequency or f_c point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and depending upon which way around they are connected, we have seen that either a Low Pass or a High Pass filter is obtained. One simple use for these types of passive filters is in audio amplifier applications or circuits such as in loudspeaker crossover filters or pre-amplifier tone controls. Sometimes it is necessary to only pass a certain range of frequencies that do not begin at 0Hz, (DC) or end at some upper high frequency point but are within a certain range or band of frequencies, either narrow or wide. By connecting or "cascading" together a single Low Pass Filter circuit with a High Pass Filter circuit, we can produce another type of passive RC filter that passes a selected range or "band" of frequencies that can be either narrow or wide while attenuating all those outside of this range. This new type of passive filter arrangement produces a frequency selective filter known commonly as a Band Pass Filter or BPF for



a)

b)

Hình 2. Các bản tin gốc cần truyền đi: a) bản tin văn bản; b) hình ảnh



Hình 3. Ví dụ minh họa phổ của các dạng nhiễu:

a) tín hiệu; b) nhiễu băng hẹp; c) nhiễu băng rộng; d) nhiễu xung

c) Nhiễu xung

Nhiễu xung là một dạng nhiễu kết hợp giữa nhiễu băng hẹp và nhiễu băng rộng. Trong trường hợp này nhiễu với phổ tương đối hẹp được chuyển dịch hay "trượt" trong một dải tần xác định nào đó theo chương trình đã chọn trước. Mặc dù hệ thống thông tin cần chế áp làm việc trong một dải tần khá rộng nhưng hiệu quả của nhiễu xung so với nhiễu băng hẹp thấp hơn. Trong những năm gần đây, người ta lại chú ý nhiều đến việc sử dụng nhiễu xung. Đó là do nhờ sử dụng

các chương trình điều khiển tối ưu để trượt phổ nhiễu trong dải tần định trước nên hiệu quả loại nhiễu tăng lên rõ rệt. Hình 3 minh họa các dạng nhiễu được sử dụng trong tác chiến điện tử

3. Đánh giá khả năng chống nhiễu của hệ thống thông tin số

Trong phần này tác giả tiến hành đánh giá khả năng chống các dạng nhiễu cố ý thông dụng trong tác chiến điện tử của hệ thống thông tin số khi sử dụng mã Turbo và khi không sử dụng với các nguồn tin cần truyền là bản tin văn bản và hình ảnh (Hình 2).

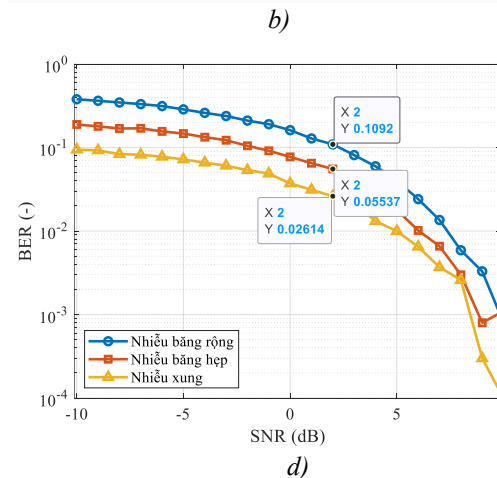
3.1. Không sử dụng mã Turbo

Trong phần này tác giả tiến hành đánh giá khả năng chống nhiễu của hệ thống thông tin khi không sử dụng mã hóa kênh Turbo với các nguồn tin cần truyền là bản tin văn bản và hình ảnh dưới tác động của các dạng nhiễu khác nhau với dạng điều chế sử dụng là BPSK.

The Passive Band Pass Filter can be used to isolate or filter out certain frequencies that lie within a particular band or range of frequencies. The cut-off frequency or γ point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and γ can be adjusted by changing the value of the capacitor. The cut-off frequency or γ point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and γ can be adjusted by changing the value of the capacitor. The cut-off frequency or γ point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and γ can be adjusted by changing the value of the capacitor.

The Passive Band Pass Filter can be used to isolate or filter out certain frequencies that lie within a particular band or range of frequencies. The cut-off frequency or γ point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and γ can be adjusted by changing the value of the capacitor. The cut-off frequency or γ point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and γ can be adjusted by changing the value of the capacitor.

The Passive Band Pass Filter can be used to isolate or filter out certain frequencies that lie within a particular band or range of frequencies. The cut-off frequency or γ point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and γ can be adjusted by changing the value of the capacitor. The cut-off frequency or γ point in a simple RC passive filter can be accurately controlled using just a single resistor in series with a non-polarized capacitor, and γ can be adjusted by changing the value of the capacitor.



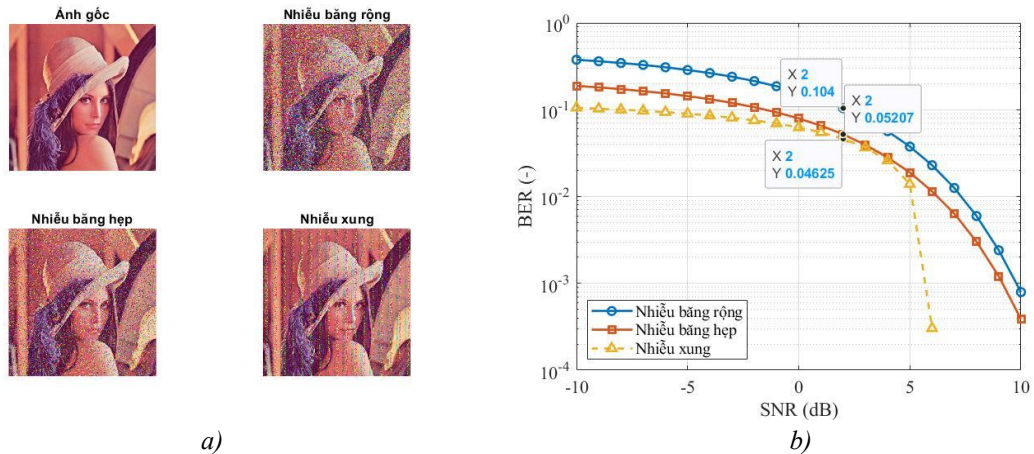
Hình 4. Bản tin sau giải mã tại máy thu với SNR = 0 dB sử dụng các dạng nhiễu khác nhau:

a) nhiễu băng rộng; b) nhiễu băng hẹp; c) nhiễu xung; d) BER phụ thuộc vào SNR

a) Bản tin văn bản

Hình 4 là kết quả bản tin sau giải điều chế, giải mã tại máy thu với các dạng nhiễu khác nhau (SNR = 0dB). Với nhiễu băng rộng (Hình 4a), văn bản bị biến dạng hoàn toàn do năng lượng nhiễu trải đều trên toàn phổ, khiến cho bản tin truyền đi gần như không thể phục hồi. Khi giảm độ rộng phổ nhiễu xuống 50% so với băng rộng (nhiều băng hẹp), lỗi ký tự chỉ xuất hiện cục bộ trên một phần nội dung, trong khi các vùng còn lại vẫn giữ được cấu trúc ban đầu. Ngược lại, nhiễu xung gây suy giảm thông tin theo dạng từng đoạn rời rạc, do nhiễu xung tác động trong thời gian ngắn; phần lớn văn bản vẫn còn nhận biết được. Ba trường hợp này cho thấy mức độ phá hoại tăng dần theo phạm vi năng lượng nhiễu và đặc trưng thời gian tác động.

Hình 4d biểu diễn sự phụ thuộc của BER theo SNR. Kết quả cho thấy với toàn dải khảo sát, nhiễu băng rộng luôn có tác động lớn nhất (màu xanh), tiếp theo là nhiễu băng hẹp (50% so với nhiễu băng rộng – màu đỏ), cuối cùng là nhiễu xung (màu cam). Tuy nhiên hạn chế chung của nhiễu băng rộng là cần công suất lớn và khó thực hiện trên toàn bộ băng tần rộng dẫn tới khó khăn trong việc chế tạo thành các trang thiết bị.



Hình 5. Hình ảnh thu được tại máy thu dưới tác động của các dạng nhiễu khác nhau:

a) SNR = 0 dB; b) BER phụ thuộc vào SNR

b) Hình ảnh

Tương tự như phần trước, mục này đánh giá ảnh hưởng của các dạng nhiễu lên quá trình truyền ảnh. Kết quả được trình bày trong Hình 5. Quan sát Hình 5a cho thấy nhiễu băng rộng, do tác động đồng thời lên toàn bộ ảnh, làm giảm đáng kể độ sắc nét và che mờ nhiều chi tiết của ảnh thu. Trong khi đó, nhiễu băng hẹp chỉ ảnh hưởng đến một phần bit màu của ảnh, nên mức độ suy giảm chất lượng ảnh nhẹ hơn và các vùng không bị nhiễu vẫn giữ được cấu trúc ban đầu. Đối với nhiễu xung, sai lệch bit xuất hiện theo từng cụm liên tục trong thời gian tồn tại của xung, tạo thành các sọc nhiễu đặc trưng trên ảnh nhưng không phá hủy toàn bộ nội dung.

Hình 5b thể hiện BER phụ thuộc vào giá trị SNR. Hình 5b cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa ba dạng nhiễu khi xét theo chỉ số BER và mức SNR. Tại SNR = 2 dB, nhiễu băng rộng cho BER xấp xỉ $1,04 \times 10^{-1}$, cao nhất trong ba trường hợp, phản ánh mức độ phá hủy mạnh do nhiễu tác động lên toàn bộ phổ tín hiệu. Ở cùng mức SNR, nhiễu băng hẹp đạt BER khoảng $5,2 \times 10^{-2}$, tương đương chỉ bằng một nửa so với nhiễu băng rộng nhờ chỉ ảnh hưởng lên một phần tín hiệu. Đối với nhiễu xung, BER tiếp tục giảm xuống còn $4,6 \times 10^{-2}$, thấp nhất trong cả ba dạng nhiễu vì sai bit chỉ xuất hiện cục bộ trong các khoảng thời gian tồn tại của xung.

Khi SNR tăng, cả ba đường BER đều giảm nhưng tốc độ suy giảm khác nhau. Nhiễu băng rộng giảm chậm nhất và luôn duy trì BER cao hơn các dạng còn lại trong toàn dải SNR. Nhiễu băng hẹp cho BER trung bình và xu hướng giảm đều theo SNR. Đáng chú ý, nhiễu xung giảm rất nhanh khi SNR > 5 dB, thể hiện tính chất nhiễu cục bộ: khi biên độ xung giảm, tác động lên tín hiệu gần như triệt tiêu hoàn toàn.

3.2. Sử dụng mã Turbo

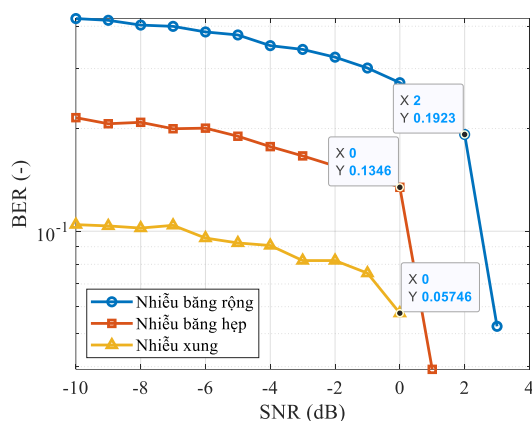
Sau khi phân tích hiệu năng hệ thống truyền bản tin, hình ảnh với dạng điều chế BPSK dưới tác động của ba dạng nhiễu khác nhau, phần này tiếp tục mở rộng đánh giá sang trường hợp hệ thống được trang bị mã hóa kênh Turbo. Tham số của mã Turbo được tổng hợp trong Bảng 1.

Hình 6a cho thấy bộ mã Turbo cải thiện hiệu năng BER của hệ thống BPSK trong cả ba môi trường nhiễu. Đối với nhiễu băng rộng BER giảm chậm theo SNR (SNR = 2 dB, BER = 0,19, đường màu xanh) do toàn bộ bit đều bị tác động, khiến bộ giải mã Turbo khó khôi phục hoàn toàn chuỗi dữ liệu. Ngược lại, với nhiễu băng hẹp, nơi chỉ một phần phổ tín hiệu bị phá hoại, Turbo phát

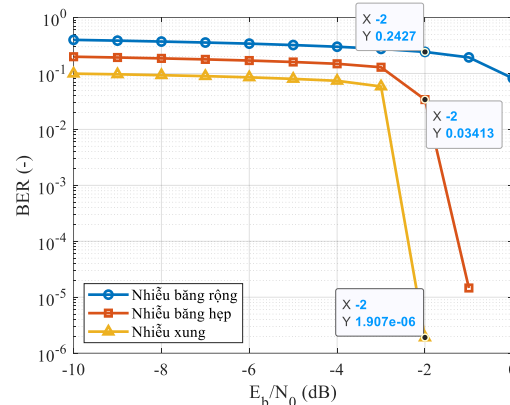
huy hiệu quả sửa lỗi tốt hơn, thể hiện qua việc BER giảm nhanh hơn và xuất hiện điểm gãy rõ rệt khi $\text{SNR} > 0$ dB (đường màu đỏ). Đáng chú ý nhất là nhiễu xung, trong đó nhiễu chỉ tác động theo từng cụm thời gian. Nhờ khả năng sửa lỗi burst đặc trưng, Turbo đạt hiệu năng tốt nhất trong trường hợp này và nhanh chóng đưa BER xuống mức rất thấp khi SNR tăng ($\text{SNR} = 0$ dB, $\text{BER} = 0,06$, đường màu cam). Các kết quả này phù hợp với lý thuyết mã Turbo, trong đó bộ mã đặc biệt hiệu quả khi nhiễu không phân bố đều theo thời gian.

Bảng 1. Tham số cơ bản của mã Turbo

Tham số	Giá trị
Đa thức sinh	$\begin{cases} g_1(D) = 1 + D^2 + D^3 & (1011 = 13) \\ g_2(D) = 1 + D + D^3 & (1011 = 15) \end{cases}$
Đa thức phản hồi	$g_1(D) = 1 + D^2 + D^3 \quad (1011 = 13)$
Cấu trúc bộ đan xen	Hàm ngẫu nhiên có độ dài tương ứng độ dài chuỗi mã 0-1
Tốc độ mã	1/3
Số lần lặp giải mã	6



a)



b)

Hình 6. BER phụ thuộc vào SNR khi sử dụng mã Turbo: a) bản tin văn bản; b) hình ảnh

Hình 6b thể hiện BER phụ thuộc vào SNR khi truyền hình ảnh qua hệ thống sử dụng mã Turbo. Các kết quả cho thấy, xu thế tác động của các dạng nhiễu cũng giống như khi truyền bản tin văn bản. Nhiều băng rộng có tác động lớn nhất ($\text{BER} = 0,25$ tại $\text{SNR} = -2$ dB, đường màu xanh), tiếp theo là băng hẹp (đường màu đỏ, $\text{SNR} = -2$ dB, $\text{BER} = 0,034$) và cuối cùng là nhiễu xung (đường màu cam). Đồ thị cũng cho thấy, khi $\text{SNR} < 0$ khả năng chống nhiễu của mã Turbo thấp, ngược lại khi $\text{SNR} > 0$ dB, mã Turbo thể hiện khả năng chống nhiễu vượt trội. Khả năng chống nhiễu của hệ thống khi có và không có mã Turbo ở mức $\text{SNR} = -2$ dB được tổng hợp trong Bảng 2.

Bảng 2. Bảng đánh giá khả năng chống nhiễu của mã Turbo

Dạng nhiễu	Bản tin văn bản		Hình ảnh	
	Không mã Turbo	Có mã Turbo	Không mã Turbo	Có mã Turbo
Nhiều băng rộng	0,33	0,31	0,22	0,25
Nhiều băng hẹp	0,16	0,11	0,11	0,034
Nhiều xung	0,08	0,05	0,08	1,9e-6

Bảng 2 cho thấy khả năng chống nhiễu của mã Turbo, đối với băng rộng thì khả năng chống nhiễu còn hạn chế (truyền hình ảnh $\text{BER} = 0,22$ (không có mã Turbo) và $\text{BER} = 0,25$ (có mã)). Tuy nhiên, khả năng chống nhiễu băng hẹp và nhiễu xung vượt trội khi truyền hình ảnh ($\text{BER} = 0,08$ (không có nhiễu) và $\text{BER} = 0$ (có mã Turbo)).

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã mô phỏng và đánh giá hiệu năng hệ thống truyền dữ liệu sử dụng điều chế BPSK đối với hai loại thông tin là bản tin văn bản và hình ảnh, dưới tác động của ba dạng nhiễu chủ động gồm nhiễu băng rộng, nhiễu băng hẹp và nhiễu xung. Các kết quả thu được từ mô phỏng cho thấy hệ thống không sử dụng mã hóa kênh bị ảnh hưởng lớn trước các dạng nhiễu này, đặc biệt là nhiễu băng rộng; BER tăng cao dẫn đến bản tin thu sai lệch và hình ảnh suy giảm nghiêm trọng về độ sắc nét và cấu trúc. Đối với nhiễu băng hẹp và nhiễu xung, lỗi bit xuất hiện theo từng vùng hoặc theo chu kỳ thời gian, gây ra các biến dạng cục bộ rõ rệt trên hình ảnh và nội dung văn bản.

Khi áp dụng mã Turbo, hiệu năng hệ thống cải thiện đáng kể trong cả hai loại dữ liệu. Turbo cho khả năng sửa lỗi hiệu quả, đặc biệt trong môi trường nhiễu có tính chất cục bộ, giúp giảm BER nhanh theo SNR ($\text{SNR} > 2 \text{ dB}$) và khôi phục chính xác phần lớn nội dung thông tin ngay cả trong điều kiện nhiễu trung bình. Đối với nhiễu băng hẹp và nhiễu xung, Turbo cho thấy khả năng khử lỗi vượt trội ($\text{SNR} > 0 \text{ dB}$), thể hiện qua BER thấp và hình ảnh tái tạo giữ được chi tiết quan trọng. Mặc dù mức cải thiện trong nhiễu chặn toàn băng thấp hơn do đặc tính phá hoại đồng thời, Turbo vẫn mang lại hiệu quả đáng kể so với hệ thống không mã hóa.

Các kết quả mô phỏng khẳng định rằng mã Turbo là giải pháp phù hợp để nâng cao độ tin cậy của hệ thống truyền text và hình ảnh trong môi trường nhiễu chủ động, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo với các kỹ thuật mã hóa tiên tiến hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. Haykin, *Communication Systems*, 4rd ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA, 2000.
- [2] R. Poisel, *Modern Communications Jamming Principles and Techniques*, Artech House, Boston, 2011.
- [3] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1," *Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications*, Geneva, Switzerland, 1993, vol. 2, pp. 1064-1070, doi: 10.1109/ICC.1993.397441.
- [4] A. Giulietti, B. Bougard, and L. Van der Perre, "Turbo Codes," in *Turbo Codes*. Springer, Boston, MA., 2004, doi: 10.1007/978-1-4615-0477-1_1.
- [5] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, McGraw-Hill Higher Education, New York, USA, 2008.
- [6] M. K. Simon and M. Alouini, *Digital Communication over Fading Channel*, John Wiley & Sons, Inc, New York, USA, 2000.
- [7] M. Tuchler, A. C. Singer, and R. Koetter, "Minimum mean squared error equalization using a priori information," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 3, pp. 673-683, March 2002, doi: 10.1109/78.984761.
- [8] H. Pirayesh and H. Zeng, "Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 767-809, 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3159185.
- [9] D. C. Schleher, *Introduction to Electronic Warfare*, Artech House, USA, 2009.
- [10] D. Adamy, *EW 101: A First Course in Electronic Warfare*, Artech House, USA, 2001.
- [11] W. Liu, H. Li, and Y. Liu, "Anti-jamming Communications Using Spectrum Waterfall: A Deep Reinforcement Learning Approach," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 998-1001, 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2815018.
- [12] A. Al-Kashoash and M. Kemp, "In-Depth Analysis of Signal Jammers and Anti-Jamming Effect on 5G Signal," *2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/FiCloudW.2019.00014.
- [13] H. Jiang, L. Wang, and Y. Wang, "Efficient Low-Complexity Turbo-Hadamard Coding for Anti-Jamming UAV Communications," *Electronics*, vol. 11, no. 7, 2022, doi: 10.3390/electronics11071088.
- [14] F. Gabry, H. Behel, and G. Cavalcante, "Analysis of Error-Correcting Codes for Burst and Impulsive Noise Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 435-439, 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3027660.