

TIỂU LUẬN

Khai phá dữ liệu và học máy
Tấn công Elastic-Net vào Deep Neuron Network
qua một số mẫu đối nghịch

Đại học Quốc gia Hà Nội
Đại học Khoa học Tự nhiên
Khoa Toán cơ tin

Giảng viên:

Trần Trọng Hiếu

Học viên:

Nguyễn Mạnh Linh, Đào Thị Thu Hồng

Mục lục

1	Giới thiệu	1
2	Các nghiên cứu liên quan	4
2.1	Tấn công vào DNNs	4
2.2	Phòng thủ trong DNNs	5
3	EAD: Tấn công Elastic-Net vào mạng DNNs	6
3.1	Sơ bộ về hiệu chỉnh Elastic-Net	6
3.2	Xây dựng thuật toán EAD	6
3.3	Thuật toán EAD	7
4	Đánh giá hiệu năng	10
4.1	Các phương pháp đối sánh	10
4.2	Thiết kế thực nghiệm	10
4.3	Đánh giá các độ đo	12
4.4	Phân tích độ nhạy và luật quyết định	12
4.5	Tỷ lệ tấn công thành công và nhiễu trên các tập dữ liệu MNIST, CIFAR10 và ImageNet	14
4.6	Phá vỡ chứng cất phòng thủ	14
4.7	Cải thiện tấn công chuyển giao	15
4.8	Huấn luyện đối nghịch bổ sung	16
5	Kết luận	17

Tóm tắt

Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra tính dễ bị tổn thương của các mạng neuron sâu (Deep Neural Networks - DNNs) đến các mẫu đối nghịch - một cách trực quan, hình ảnh đối nghịch không thể phân biệt có thể được tạo ra một cách dễ dàng khiến các mô hình được huấn luyện tốt cũng phân loại ảnh sai. Các phương pháp hiện có để tạo ra mẫu đối nghịch thường dựa trên thông số biến dạng L_2 và L_∞ . Mặc dù trong thực tế độ biến dạng L_1 là quan trọng và quyết định đến tính thừa của nhiễu lại ít được xem xét. Trong bài này, tác giả thiết kế một quy trình tấn công DNNs thông qua mẫu đối nghịch như một bài toán tối ưu hóa sử dụng hiệu chỉnh elastic-net. Tấn công DNNs bằng elastic-net (EAD) với tham số L_1 được thêm vào cùng với tấn công L_2 . Kết quả thực nghiệm trên các tập dữ liệu MNIST, CIFAR10 và ImageNet chỉ ra rằng EAD có thể mang lại một tập mẫu đối nghịch với độ nhiễu L_1 nhỏ và đạt được hiệu suất tấn công tương đương với các phương pháp hiện đại nhất qua các kịch bản tấn công khác nhau. Quan trọng hơn, EAD dẫn đến sự cải tiến trong việc tấn công DNNs và gợi ý những hiểu biết mới về hiệu chỉnh L_1 để cải thiện bảo mật trong các mô hình học máy.

1 Giới thiệu

Mạng nơ ron sâu (DNNs) đã đạt hiệu quả rất tốt với các bài toán trong học máy và trí tuệ nhân tạo như phân loại ảnh, nhận diện giọng nói, dịch máy và trò chơi. Mặc dù DNNs rất hiệu quả nhưng một số nghiên cứu gần đây đã chứng minh DNNs rất dễ "tổn thương" với các mẫu đối nghịch (Szegedy et al. 2013; Goodfellow, Shlens, and Szegedy 2015). Ví dụ, một hình ảnh với nhiễu được thiết kế cẩn thận có thể làm cho một DNN đã được huấn luyện phân loại sai. Hơn nữa, các mẫu đối nghịch được tạo ra hầu như không thể phân biệt được bằng mắt người.



Hình 1.1: Minh họa trực quan về mẫu đối nghịch được sinh bởi EAD. Hình gốc (đà điểu) được lấy từ tập ImageNet. Các mẫu đối nghịch bị phân loại sai với mô hình Inception-v3.

Ví dụ trực quan trên thể hiện 3 mẫu đối nghịch của một hình con đà điểu ("ostrich") được sinh ra bằng thuật toán của chúng tôi. Các mẫu này được mô hình Inception-v3 (Szegedy et al. 2016) phân loại thành "safe", "shoe shop" và "vacuum".

Sự thiếu mạnh mẽ của DNNs thể hiện trước các mẫu đối nghịch đã làm dấy lên những lo ngại nghiêm trọng về vấn đề bảo mật các ứng dụng, bao gồm nhận dạng tín hiệu giao thông và phát hiện phần mềm độc hại. Hơn nữa, vượt ra ngoài không gian kỹ thuật số, các nhà nghiên cứu đã chỉ ra rằng những mẫu đối nghịch này vẫn có hiệu quả trong thế giới vật chất trong việc đánh lừa DNNs (Kurakin, Goodfellow, and Bengio 2016a; Evtimov et al. 2017). Do tính mạnh mẽ và ý nghĩa bảo mật, các phương tiện tạo ra các mẫu đối nghịch được gọi là các cuộc tấn công (*attacks*) vào DNNs. Cụ thể, các cuộc tấn công có chủ đích (*targeted attacks*) nhằm mục đích tạo ra các mẫu đối nghịch được phân loại nhầm thành các lớp mục tiêu cụ thể và các cuộc tấn công không nhắm mục tiêu (*untargeted attacks*) nhằm mục đích để tạo ra các mẫu đối nghịch không được phân loại như lớp học ban đầu. Các cuộc tấn công chuyển giao (*transfer attacks*) nhằm mục đích tạo ra các mẫu đối nghịch có thể chuyển từ mô hình DNN này sang mô hình DNN khác. Ngoài việc đánh giá mức độ mạnh mẽ của DNNs, Các mẫu đối nghịch có thể được sử dụng để huấn luyện một mô hình mạnh có khả năng chống chịu với những xáo trộn của đối nghịch, được gọi

là huấn luyện đối nghịch (*adversarial training*) (Madry et al. 2017). Chúng cũng có thể được sử dụng để giải thích DNNs (Koh và Liang 2017; Dong et al. 2017).

Trong bài báo này, tác giả sử dụng các mẫu đối nghịch để tấn công phân loại ảnh dựa trên mạng neuron tích chập. Mẫu đối nghịch được tạo ra để làm sai lệch kết quả dự đoán và phải đảm bảo hình mới tạo ra (gần) giống với hình gốc. Trong quá khứ, sự giống nhau giữa mẫu đối nghịch được tạo ra và hình gốc được đo bằng các độ đo nhiễu (*distortion metrics*) khác nhau. Một metric thường được sử dụng là chuẩn L_q với $\|x\|_q = (\sum_{i=1}^p |x_i|^q)^{\frac{1}{q}}$ kí hiệu chuẩn L_q của vector p chiều $x = [x_1, \dots, x_p]$ với $q \geq 1$. Đặc biệt, khi tạo ra các mẫu đối nghịch, độ nhiễu L_∞ được sử dụng để đánh giá sự thay đổi tối đa giá trị pixel (Goodfellow, Shlens, and Szegedy 2015), trong khi độ nhiễu L_2 được sử dụng để cải thiện chất lượng hình ảnh (Carlini and Wagner 2017b). Tuy nhiên, trong thực tế, chuẩn L_1 được sử dụng rộng rãi trong các bài toán phục hồi ảnh (Fu et al. 2006) cũng như phục hồi tính thưa (Candès and Wakin 2008). Các mẫu đối nghịch dựa trên L_1 chưa được xem xét một cách kĩ càng. Trong bài toán mẫu đối nghịch, độ biến dạng L_1 đánh giá tổng các thay đổi trong nhiễu loạn và đóng vai trò là một thành phần (hàm) lỗi đo lường số lượng pixel thay đổi (độ thưa) gây ra bởi nhiễu. Để lấp đầy khoảng trống này, chúng tôi xem xét một thuật toán tấn công dựa trên hiệu chỉnh *elastic-net*, được gọi là tấn công *elastic-net* vào DNNs (*elastic-net attacks to DNNs - EAD*). Hiệu chỉnh *elastic-net* là tổ hợp tuyến tính của các hàm penalty L_1 và L_2 và nó cũng là công cụ tiêu chuẩn cho bài toán lựa chọn tính chất đặc trưng cho dữ liệu nhiều chiều (Zou and Hastie 2005). Trong bài toán tấn công DNNs, EAD mở ra hướng nghiên cứu mới từ cách tấn công hiện đại dựa trên L_2 (Carlini and Wagner 2017b) và cũng đề xuất tấn công hiệu quả hơn theo định hướng L_1 so với các phương pháp tấn công hiện có.

Để khám phá hiệu quả của tấn công dựa trên L_1 , chúng tôi tiến hành các thử nghiệm trên tập dữ liệu MNIST, CIFAR10, và ImageNet trong các tình huống tấn công khác nhau. So sánh với các phương pháp tấn công hiện có dựa trên L_2 và L_∞ (Kurakin, Goodfellow, and Bengio 2016b; Carlini and Wagner 2017b), EAD có thể đạt được tỉ lệ tấn công thành công tương tự khi phá vỡ DNNs được phòng thủ hoặc không phòng thủ (Papernot et al. 2016b). Quan trọng hơn, tác giả chỉ ra rằng, tấn công L_1 đạt được hiệu suất vượt trội so với các cuộc tấn công L_2 và L_∞ trong các cuộc tấn công chuyển giao với các mẫu đối nghịch được huấn luyện bổ sung. Với tập dữ liệu khó nhất (MNIST), các kết quả từ EAD cải thiện tấn công chuyển giao vào DNN không được phòng thủ hay được phòng thủ đạt tỉ lệ thành công gần 99%. Thêm vào đó việc huấn luyện kèm theo với mẫu đối nghịch dựa trên L_1 và L_2 có thể tăng cường khả năng phục hồi của DNNs đối với các nhiễu loạn. Những kết quả này gợi ý rằng EAD mang lại tập mẫu đối nghịch khác biệt nhưng hiệu quả hơn. Hơn thế nữa, đánh giá các cuộc tấn công dựa trên độ nhiễu L_1 cung cấp thêm hiểu biết mới

về học máy đối kháng và sự bảo mật của DNNs, gợi ý rằng L_1 có thể bổ sung cho L_2 và L_∞ thúc đẩy các framework về học máy đối kháng hoàn thiện hơn.

2 Các nghiên cứu liên quan

Trong phần này, tác giả tổng hợp các nghiên cứu liên quan về tấn công và phòng thủ DNNs.

2.1 Tấn công vào DNNs

FGM và I-FGM: Kí hiệu \mathbf{x}_0 và \mathbf{x} lần lượt là mẫu gốc và mẫu đối nghịch, t là lớp mục tiêu cần tấn công. Các phương pháp đạo hàm nhanh (*fast gradient methods - FGM*) sử dụng gradient ∇J của hàm mất mát trong tập huấn luyện J với \mathbf{x}_0 để tạo ra các mẫu đối nghịch (Goodfellow, Shlens, and Szegedy 2015). Với tấn công L_∞ , \mathbf{x} được tính bằng công thức:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 - \epsilon \times \text{sign}(\nabla J(\mathbf{x}_0, t)) \quad (2.1)$$

Trong đó ϵ là độ biến dạng L_∞ giữa \mathbf{x} và \mathbf{x}_0 và $\text{sign}(\nabla J)$ là dấu của gradient. Với tấn công L_1 và L_2 , \mathbf{x} được tính bằng công thức:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 - \epsilon \frac{\nabla J(\mathbf{x}_0, t)}{\|\nabla J(\mathbf{x}_0, t)\|_q} \quad (2.2)$$

với $q = 1, 2$ và ϵ là độ nhiễu tương quan. Các phương pháp lặp đạo hàm nhanh (*Iterative fast gradient methods (I-FGM)*) được trình bày trong (Kurakin, Goodfellow, and Bengio 2016b) là phương pháp lặp sửa dụng FGM với một độ nhiễu mịn hơn. Các cuộc tấn công không nhắm mục tiêu sử dụng FGM và I-FGM có thể được thực hiện theo cách tương tự nhau.

C&W attack: Thay vì sử dụng hàm mất mát trên tập huấn luyện Carlini và Wagner đã thiết kế một hiệu chỉnh L_2 trong hàm mất mát dựa trên lớp logit trong DNNs để sinh ra các mẫu đối nghịch (Carlini and Wagner 2017b). Công thức này hóa ra là một trường hợp riêng của thuật toán EAD (sẽ được trình bày trong phần sau). Tấn công C&W được coi là một trong những tấn công mạnh nhất đối với DNNs vì nó có thể phá vỡ cả những DNNs được phòng thủ và chất lọc, nó cũng có thể đạt được hiệu suất đáng kể với tấn công chuyển giao.

DeepFool: là một thuật toán tấn công không nhắm mục tiêu L_2 (Moosavi-Dezfooli, Fawzi, and Frossard 2016) dựa trên lý thuyết về phép chiếu tới siêu phẳng phân tách gần nhất trong phân lớp. Nó cũng được sử dụng để tạo ra một nhiễu loạn phổ quát nhằm đánh lừa các DNNs được huấn luyện trên các hình ảnh tự nhiên (Moosavi-Dezfooli et al. 2016).

2.2 Phòng thủ trong DNNs

Defensive distillation: Chứng cất phòng thủ (Papernot et al.2016b) bảo vệ chống lại sự nhiễu loạn của đối nghịch bằng cách sử dụng kỹ thuật chưng cất trong (Hinton, Vinyals, and Dean 2015) để huấn luyện lại cùng một mạng với xác suất lớp được dự đoán bởi mạng ban đầu. Phương pháp này đưa ra tham số nhiệt độ T trong lớp softmax để tăng cường độ mạnh đối với những xáo trộn của mẫu đối nghịch.

Adversarial training: Có thể được triển khai theo 1 số cách khác nhau. Hướng tiếp cận chuẩn là thêm vào tập dữ liệu huấn luyện ban đầu các mẫu đối nghịch đã được sửa đúng nhãn, sau đó huấn luyện lại mạng. (Zheng et al. 2016; Madry et al. 2017; Tram'et et al. 2017; Zantedeschi, Nicolae, and Rawat 2017) đề xuất điều chỉnh training loss hoặc kiến trúc mạng để tăng cường sức mạnh của DNNs trước mẫu đối nghịch.

Detection methods: Sử dụng các test thống kê để phân biệt các mẫu đối nghịch với mẫu gốc (Feinman et al. 2017; Grosse et al. 2017; Lu, Issaranon, and Forsyth 2017; Xu, Evans, and Qi 2017). Tuy nhiên, 10 phương pháp phát hiện khác nhau đã không thể phát hiện được tấn công C&W (Carlini and Wagner 2017a).

3 EAD: Tấn công Elastic-Net vào mạng DNNs

3.1 Sơ bộ về hiệu chỉnh Elastic-Net

Hiệu chỉnh elastic-net là công nghệ được sử dụng rộng rãi trong việc giải quyết các bài toán lựa chọn thuộc tính nhiều chiều (Zou and Hastie 2005). Nó được xem là công cụ hiệu chỉnh trong đó tổ hợp tuyến tính hàm phạt (*penalty*) L_1 và L_2 . Nhìn chung, hiệu chỉnh elastic-net được sử dụng trong bài toán cực tiểu hóa sau đây:

$$\text{minimize}_{\mathbf{z} \in \mathcal{Z}} f(\mathbf{z}) + \lambda_1 \|\mathbf{z}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{z}\|_2^2 \quad (3.1)$$

Trong đó \mathbf{z} là vector của p biến tối ưu, \mathcal{Z} là tập nghiệm chấp nhận được, $f(\mathbf{z})$ là hàm mất mát, $\|\mathbf{z}\|_q$ là chuẩn q của \mathbf{z} và $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$ tương ứng là các tham số hiệu chỉnh L_1 và L_2 . Biểu thức $\lambda_1 \|\mathbf{z}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{z}\|_2^2$ được gọi là hiệu chỉnh elastic-net của \mathbf{z} . Với bài toán hồi quy chuẩn, hàm mất mát $f(\mathbf{z})$ là hàm lỗi trung bình bình phương (*mean squared error - MSE*), vector \mathbf{z} biểu diễn trọng số của các thuộc tính và $\mathcal{Z} = \mathbb{R}^p$. Hiệu chỉnh elastic-net trong phương trình 3.1 chính là công thức Lasso khi $\lambda_2 = 0$ và trở thành công thức hồi quy Ridge khi $\lambda_1 = 0$. (Zou and Hastie 2005) đã chỉ ra rằng hiệu chỉnh elastic-net có thể chọn ra 1 nhóm các thuộc tính tương quan mạnh, mà có thể khắc phục sự thiếu sót của việc chọn lựa thuộc tính nhiều chiều khi sử dụng 1 mình hồi quy Lasso hoặc Ridge.

3.2 Xây dựng thuật toán EAD

Từ tấn công C&W (Carlini and Wagner 2017b), ta thêm vào cùng hàm mất mát f để sinh ra các mẫu đối nghịch. Đặc biệt, cho trước 1 ảnh \mathbf{x}_0 và nhãn đúng của nó là t_0 , gọi \mathbf{x} là mẫu đối nghịch của \mathbf{x}_0 với lớp đích nhắm đến là $t \neq t_0$. Hàm mất mát $f(\mathbf{x})$ cho tấn công nhắm đích là:

$$f(\mathbf{x}, t) = \max \left(\max_{j \neq t} [\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_j - [\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_t, -\kappa \right) \quad (3.2)$$

Trong đó $\mathbf{Logit}(\mathbf{x}) = [\mathbf{Logit}(\mathbf{x})_1, \dots, \mathbf{Logit}(\mathbf{x})_K] \in \mathbb{R}^K$ là lớp logit (lớp trước softmax) biểu diễn cho \mathbf{x} trong mạng DNN, K là số lượng lớp cần phân loại, $\kappa > 0$ là tham số tin cậy, nó đảm bảo một khoảng cách cố định giữa $\max_{j \neq t} [\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_j$ và $[\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_t$.

Cần lưu ý rằng, thành phần $[\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_t$ là xác suất dự đoán x có nhãn t theo luật phân loại của hàm softmax:

$$\text{Prob}(\text{Label}(\mathbf{x}) = t) = \frac{\exp([\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_t)}{\sum_{j=1}^K \exp([\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_j)} \quad (3.3)$$

Do đó, hàm mất mát trong phương trình 3.2 có mục đích là để cho ra nhãn t là lớp có xác suất cao nhất của x và tham số κ đảm bảo sự phân biệt giữa lớp t và lớp dự đoán gần nhất khác với t . Với tấn công không nhắm mục tiêu, hàm mất mát trong phương trình 3.2 trở thành:

$$f(\mathbf{x}) = \max \left([\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_{t_0} - \max_{j \neq t} [\mathbf{Logit}(\mathbf{x})]_j, -\kappa \right) \quad (3.4)$$

Trong bài viết này, chúng tôi tập trung vào tấn công nhắm mục tiêu vì nó khó hơn là không nhắm mục tiêu. Thuật toán EAD có thể được áp dụng trực tiếp vào tấn công không nhắm mục tiêu bằng cách thay $f(\mathbf{x}, t)$ trong phương trình 3.2 thành $f(\mathbf{x})$ trong phương trình 3.4.

Ngoài ra, để thao túng kết quả dự đoán thông qua hàm mất mát trong 3.2, hiệu chỉnh elastic-net còn tạo ra mẫu đối nghịch tương tự với ảnh gốc. Công thức tấn công elastic-net vào mạng DNNs (EAD) để tạo ra mẫu đối nghịch (\mathbf{x}, t) cho ảnh gốc (\mathbf{x}_0, t_0) như sau:

$$\begin{aligned} & \text{minimize}_{\mathbf{x}} \quad c \times f(\mathbf{x}, t) + \beta \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_1 + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^2 \\ & \text{st } \mathbf{x} \in [0, 1]^p \end{aligned} \quad (3.5)$$

Với $f(\mathbf{x}, t)$ được xác định trong phương trình 3.2, $c, \beta \geq 0$ lần lượt là các tham số hiệu chỉnh của hàm mất mát f và hàm phạt L_1 . Miền ràng buộc $\mathbf{x} \in [0, 1]^p$ giữ cho \mathbf{x} trong một không gian ảnh mà có thể dễ dàng thỏa mãn điều kiện bằng cách chia mỗi giá trị của pixel cho giá trị lớn nhất (ví dụ 255). Để xác định Khoảng cách (nhiều) giữa \mathbf{x} và \mathbf{x}_0 bằng $\delta = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$, công thức EAD trong 3.5 được tạo ra để tìm một mẫu đối nghịch \mathbf{x} mà sẽ được phân loại vào lớp mục tiêu t , đồng thời cực tiểu hóa δ trong hàm mất mát elastic-net $\beta \|\delta\|_1 + \|\delta\|_2^2$. Đáng chú ý, công thức tấn công C&W (Carlini and Wagner 2017b) trở thành trường hợp đặc biệt của EAD trong công thức 3.5 khi $\beta = 0$, không phụ thuộc vào L_1 của δ . Tuy nhiên thành phần phạt L_1 là một hiệu trực quan để tạo ra mẫu đối nghịch do $\|\delta\|_1 = \sum_{i=1}^p |\delta_i|$ biểu diễn tổng sai khác của nhiều và được sử dụng rộng rãi như là hàm thay thế để phát triển các nhiễu thưa. Phần đánh giá hiệu năng sẽ chứng minh rằng khi đưa thành phần L_1 vào nhiễu sẽ sinh ra tập phân biệt các mẫu đối nghịch, và nó cải thiện khả năng chuyển giao tấn công và triển khai huấn luyện đối nghịch.

3.3 Thuật toán EAD

Khi giải bài toán EAD trong 3.5 mà không có thành phần L_1 , Carlini and Wagner sử dụng kỹ thuật COV (change-of-variable) qua hàm \tanh trên \mathbf{x} nhằm mục đích loại bỏ ràng buộc $\mathbf{x} \in [0, 1]^p$ (Carlini and Wagner 2017b). Khi $\beta > 0$, ta thấy COV sẽ không hiệu quả để giải bài toán 3.5 vì mẫu đối nghịch tương ứng sẽ không nhạy

cảm với thay đổi trên β (xem phần đánh giá hiệu năng để biết chi tiết). Vì L_1 không khả vi trên toàn không gian, COV không giải được bài toán 3.5 do không dùng được phương pháp dưới đạo hàm (*subgradient*) trong việc giải bài toán tối ưu (Duchi and Singer 2009).

Để giải bài toán EAD trong 3.5 để sinh ra các mẫu đối nghịch, bài viết này đề xuất sử dụng thuật toán ISTA (*iterative shrinkage-thresholding algorithm* – *thuật toán lặp với ngưỡng biến đổi*) (Beck and Teboulle 2009). ISTA là một thuật toán tối ưu bậc nhất phổ biến, ISTA thêm một bước điều chỉnh ngưỡng trong mỗi bước lặp. Cụ thể, đặt $g(\mathbf{x}) = c \times f(\mathbf{x}) + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|_2^2$ và đặt $\nabla g(\mathbf{x})$ là gradient của $g(\mathbf{x})$ được tính bởi mạng DNN. Tại bước lặp thứ $k+1$, mẫu đối nghịch $\mathbf{x}^{(k+1)}$ của \mathbf{x}_0 được tính như sau:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = S_\beta(\mathbf{x}^{(k)} - \alpha_k \nabla g(\mathbf{x}^{(k)})) \quad (3.6)$$

Trong đó, α_k là độ dài bước tại bước lặp thứ $k+1$, $S_\beta : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^p$ là hàm của phép chiếu biến đổi ngưỡng trên từng phần tử, được xác định bởi:

$$[S_\beta(\mathbf{z})]_i = \begin{cases} \min\{\mathbf{z}_i - \beta, 1\} & \text{nếu } \mathbf{z}_i - \mathbf{x}_{0i} > \beta; \\ \mathbf{x}_{0i} & \text{nếu } |\mathbf{z}_i - \mathbf{x}_{0i}| \leq \beta; \\ \max\{\mathbf{z}_i + \beta, 0\} & \text{nếu } \mathbf{z}_i - \mathbf{x}_{0i} < -\beta \end{cases} \quad (3.7)$$

Với $i \in \{1, \dots, p\}$. Nếu $|\mathbf{z}_i - \mathbf{x}_{0i}| > \beta$, thành phần \mathbf{z}_i được co lại với hệ số β và chiếu thành phần kết quả lên miền ràng buộc chấp nhận được thuộc đoạn $[0, 1]$. Mặt khác, nếu $|\mathbf{z}_i - \mathbf{x}_{0i}| \leq \beta$, nó đặt ngưỡng \mathbf{z}_i bằng cách thiết lập $[S_\beta(\mathbf{z})]_i = \mathbf{x}_{0i}$. Chúng minh thuật toán tối ưu sử dụng 3.6 để giải bài toán EAD trong 3.5 được trình bày trong tài liệu ¹

Algorithm 1 Elastic-Net Attacks to DNNs (EAD)

Input: original labeled image (\mathbf{x}_0, t_0) , target attack class t , attack transferability parameter κ , L_1 regularization parameter β , step size α_k , # of iterations I

Output: adversarial example \mathbf{x}

Initialization: $\mathbf{x}^{(0)} = \mathbf{y}^{(0)} = \mathbf{x}_0$

for $k = 0$ to $I - 1$ **do**

$\mathbf{x}^{(k+1)} = S_\beta(\mathbf{y}^{(k)} - \alpha_k \nabla g(\mathbf{y}^{(k)}))$

$\mathbf{y}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k+1)} + \frac{k}{k+3}(\mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{x}^{(k)})$

end for

Decision rule: determine \mathbf{x} from successful examples in $\{\mathbf{x}^k\}_{k=1}^I$ (EN rule or L_1 rule).

Thuật toán EAD để tạo mẫu đối nghịch được tổng kết với mã giả trên. Để tính toán hiệu quả, ta triển khai FISTA (fast ISTA) cho EAD, nó sẽ cho tốc độ hội tụ tối ưu

¹ <https://arxiv.org/abs/1709.04114>

với phương pháp tối ưu hóa bậc 1 (Beck and Teboulle 2009). Vector $\mathbf{y}^{(k)}$ trong thuật toán 1 kết hợp với momen trong $\mathbf{x}^{(k)}$. Trong phép lặp EAD, bước lặp $\mathbf{y}^{(k)}$ được coi là mẫu đối nghịch thành công của \mathbf{x}_0 nếu mô hình dự báo thành lớp đích t . Mẫu đối nghịch \mathbf{x} cuối cùng được lựa chọn từ tất cả các mẫu đối nghịch thành công. Trong bài viết này, chúng ta xem xét 2 luật để chọn \mathbf{x} từ tập các mẫu đối nghịch thành công: elastic-net tối thiểu (EN) và nhiễu L_1 tương ứng với \mathbf{x}_0 . Sự ảnh hưởng của β , κ và luật quyết định lên EAD sẽ được nghiên cứu trong phần tiếp theo.

4 Đánh giá hiệu năng

Trong phần này, chúng ta so sánh EAD với các thuật toán tấn công tiên tiến hiện nay trên 3 tập dữ liệu ảnh: MNIST, CIFAR10 và ImageNet. Tác giả bài viết muốn cho thấy:

- EAD có thể thu được hiệu năng tấn công tương tự tấn công C&W đối với mạng DNNs phòng thủ và mạng DNN không phòng thủ do C&W là trường hợp đặc biệt của EAD khi $\beta = 0$.
- So sánh với các phương pháp tấn công hiện tại dựa trên L_1 như FGM, I-FGM, các mẫu đối nghịch thu được từ EAD có nhiều L_1 nhỏ hơn đáng kể và tỷ lệ tấn công thành công cao hơn.
- Các mẫu đối nghịch tạo bởi EAD có thể hỗ trợ tấn công chuyển giao và triển khai huấn luyện đối nghịch.

4.1 Các phương pháp đối sánh

Bài viết này so sánh EAD với các phương pháp tấn công nhắm đích hiệu quả nhất có sử dụng các loại hiệu chỉnh khác nhau:

- C&W: tấn công nhắm đích dùng hiệu chỉnh L_2 được đề xuất bởi Carlini and agner (Carlini and Wagner 2017b). Đây là trường hợp đặc biệt của EAD khi $\beta = 0$.
- FGM (fast gradient method): được đề xuất bởi (Goodfellow, Shlens, and Szegedy 2015). FGM sử dụng nhiều loại hiệu chỉnh với các phiên bản FGM- L_1 , FGM- L_1 , FGM- L_∞ .
- I-FGM: (FGM lặp): được đề xuất bởi (Kurakin, Goodfellow, and Bengio 2016b). I-FGM sử dụng nhiều loại hiệu chỉnh I-FGM- L_1 , I-FGM- L_2 , I-FGM- L_∞ .

4.2 Thiết kế thực nghiệm

Thực nghiệm sử dụng framework của Carlini và Wagner ². Với cả tấn công EAD và C&W, tác giả đều sử dụng các tham số cấu hình mặc định, trong đó triển khai 9 bước tìm kiếm nhị phân trên tham số hiệu chỉnh (bắt đầu từ 0.001) và chạy vòng lặp cho mỗi bước với learning rate khởi tạo . Để tìm các mẫu đối nghịch thành công,

² https://github.com/carlini/nn_robust_attacks

tác giả sử dụng thuật toán tối ưu tham chiếu (ADAM) cho C&W, và sử dụng thuật toán chiếu FISTA (thuật toán 1) với square-root decaying learning rate cho EAD. Tương tự tấn công C&W, mẫu đối nghịch cuối cùng tìm được từ EAD được chọn là mẫu nhiễu ít nhất giữa các mẫu đối nghịch thành công. Độ nhạy cảm của L_1 (tham số) và tác động của luật chọn trong EAD sẽ được bàn đến ở phần sau. Tác giả đặt tham số tấn công chuyển giao $\kappa = 0$ cho cả EAD và C&W.

Optimization method	β	Best case				Average case				Worst case			
		ASR	L_1	L_2	L_∞	ASR	L_1	L_2	L_∞	ASR	L_1	L_2	L_∞
COV	0	100	13.93	1.377	0.379	100	22.46	1.972	0.514	99.8	32.3	2.639	0.663
	10^{-5}	100	13.92	1.377	0.379	100	22.66	1.98	0.508	99.5	32.33	2.64	0.663
	10^{-4}	100	13.91	1.377	0.379	100	23.11	2.013	0.517	100	32.32	2.639	0.664
	10^{-3}	100	13.8	1.377	0.381	100	22.42	1.977	0.512	99.9	32.2	2.639	0.664
	10^{-2}	100	12.98	1.38	0.389	100	22.27	2.026	0.53	99.5	31.41	2.643	0.673
EAD (EN rule)	0	100	14.04	1.369	0.376	100	22.63	1.953	0.512	99.8	31.43	2.51	0.644
	10^{-5}	100	13.66	1.369	0.378	100	22.6	1.98	0.515	99.9	30.79	2.507	0.648
	10^{-4}	100	12.79	1.372	0.388	100	20.98	1.951	0.521	100	29.21	2.514	0.667
	10^{-3}	100	9.808	1.427	0.452	100	17.4	2.001	0.594	100	25.52	2.582	0.748
	10^{-2}	100	7.271	1.718	0.674	100	13.56	2.395	0.852	100	20.77	3.021	0.976

Bảng 4.1: So sánh COV và EAD trong việc tìm ra công thức elastic-net trên tập MNIST. ASR là tỷ lệ tấn công thành công. Mặc dù 2 phương pháp trên đều đạt được tỷ lệ tấn công thành công như nhau, COV không hiệu quả trong việc tạo ra các mẫu đối nghịch L_1 . Khi β tăng lên, EAD tạo ra ít mẫu đối nghịch L_1 hơn trong khi COV thì không bị ảnh hưởng nhiều khi thay đổi β .

Tác giả triển khai FGM và I-FGM bằng gói thư viện CleverHans³. Tham số nhiễu tốt nhất ϵ được xác định bằng phương pháp tìm kiếm lưới fine-grained trên mỗi ảnh, ϵ nhỏ nhất trong lưới thể hiện tấn công thành công sẽ được ghi lại. Với I-FGM, tác giả thực hiện 10 vòng lặp FGM (10 là giá trị mặc định) với ϵ -ball clipping. Tham số nhiễu ϵ' trong mỗi vòng lặp FGM được đặt là $\epsilon/10$, đã được chứng minh hiệu quả trong (Tram'et al. 2017). Dải giá trị của lưới và độ phân giải của 2 phương pháp trên được đề cập cụ thể trong tài liệu bổ sung 1.

Việc phân loại ảnh cho tập MNIST và CIFAIR10 được huấn luyện trên mô hình DNN bởi Carlini and Wagner. Để phân loại cho tập ImageNet, người ta dùng mô hình Inception-v3 (Szegedy et al. 2016). Đối với tập MNIST và CIFAIR10, tác giả lấy ngẫu nhiên trong tập test 1000 ảnh đã được phân loại đúng để tấn công làm phân loại sai. Với tập ImageNet, tác giả chọn ngẫu nhiên 100 ảnh đã được phân loại đúng và 9 ảnh được phân loại sai để tấn công. Tất cả thực nghiệm được triển khai trên thiết bị phần cứng Intel E5-2690 v3 CPU, 40 GB RAM, single NVIDIA K80 GPU. Code thực nghiệm EAD có thể được download từ github⁴

³ <https://github.com/cleverhans-lab/cleverhans>

⁴ <https://github.com/ysharma1126/EAD-Attack>

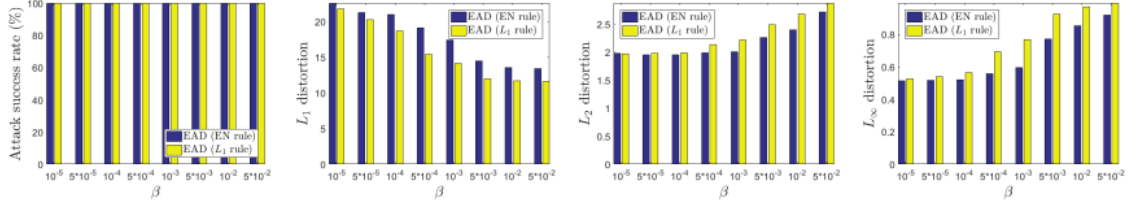
4.3 Đánh giá các độ đo

Theo cách đánh giá trong (Carlini and Wagner 2017b), tác giả báo cáo tỷ lệ tấn công thành công và độ nhiễu của mẫu đối nghịch trong mỗi phương pháp. Tỷ lệ tấn công thành công (ASR) là phần trăm mẫu đối nghịch được phân loại vào lớp đích (khác lớp gốc). Các trung bình L_1 , L_2 và L_∞ của các mẫu đối nghịch thành công cũng được ghi chép báo cáo. Cụ thể, các trường hợp sau được quan tâm:

- **Trường hợp tốt nhất:** Tấn công ít khó nhất trong số các tấn công nhắm đích sử dụng nhiễu.
- **Trường hợp trung bình:** Tấn công nhắm đích vào ngẫu nhiên 1 lớp gần như sai.
- **Trường hợp xấu nhất:** tấn công khó nhất trong số những tấn công nhắm đích sử dụng nhiễu.

4.4 Phân tích độ nhạy và luật quyết định

Tác giả kiểm tra sự cần thiết của việc sử dụng thuật toán 1 để giải bài toán tấn công bằng hiệu chỉnh elastic-net trong (3.5) bằng cách so sánh nó với thuật toán COV thuần. Trong tài liệu (Carlini and Wagner 2017b), Carlini và Wagner đã loại bỏ điều kiện ràng buộc $\mathbf{x} \in [0, 1]^p$ bằng cách thay \mathbf{x} bằng $\frac{\mathbf{1} + \tanh \mathbf{w}}{2}$ với $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^p$ và $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^p$ là vector các với các phần tử 1. Thuật toán tối ưu mặc định ADAM (Kingma and Ba 2014) được sử dụng để giải ra nghiệm \mathbf{w} và từ đó tìm được \mathbf{x} . Tác giả áp dụng thuật toán COV lên (3.5) và so sánh với EAD trên tập MNIST với các khác nhau trong bảng 1 ở trên. Mặc dù COV và EAD thu được tỷ lệ tấn công thành công tương tự nhau, người ta quan sát thấy COV không hiệu quả trong việc tạo ra các mẫu đối nghịch L_1 . Khi tăng β , EAD tạo ra ít mẫu đối nghịch L_1 hơn, trong khi các kết quả L_1 , L_2 , và L_∞ của COV thì ít chịu ảnh hưởng khi thay đổi β . Khi sử dụng các hàm thư viện TensorFlow như AdaGrad, RMSProp, SGD, người ta cũng thấy nó ít ảnh hưởng bởi β giống như trường hợp của COV. Nhóm tác giả cũng báo cáo rằng phương pháp COV cấm dùng ISTA vì thành phần hàm tanh trong hiệu chỉnh L_1 . Sự ít ảnh hưởng của COV cho thấy nó không phù hợp cho tối ưu elastic-net, do nó không hiệu quả cho bài toán tối ưu bằng subgradient (Duchi and Singer 2009). Với EAD, nhóm tác giả tìm được 1 cách thú vị đánh đổi giữa L_1 , L_2 , và L_∞ . Điều này là do khi tăng β làm tăng độ thưa của nhiễu và do đó tăng L_2 , L_∞ . Kết quả tương tự cũng được quan sát thấy với CIFAR10.



Hình 4.1: So sánh luật quyết định EN và L_1 trong EAD trên tập MNIST với nhiều tham số hiệu chỉnh L_1 β (trường hợp trung bình). So sánh với luật EN cho cùng giá trị β

	MNIST				CIFAR 10				ImageNet			
Attack method	ASR	L_1	L_2	L_∞	ASR	L_1	L_2	L_∞	ASR	L_1	L_2	L_∞
C&W (L_2)	100	22.46	1.972	0.514	100	13.62	0.392	0.044	100	232.2	0.705	0.03
FGM- L_1	39	53.5	4.186	0.782	48.8	51.97	1.48	0.152	1	61	0.187	0.007
FGM- L_2	34.6	39.15	3.284	0.747	42.8	39.5	1.157	0.136	1	2338	6.823	0.25
FGM- L_∞	42.5	127.2	6.09	0.296	52.3	127.81	2.373	0.047	3	3655	7.102	0.014
I-FGM- L_1	100	32.94	2.606	0.591	100	17.53	0.502	0.055	77	526.4	1.609	0.054
I-FGM- L_2	100	30.32	2.41	0.561	100	17.12	0.489	0.054	100	774.1	2.358	0.086
I-FGM- L_∞	100	71.39	3.472	0.227	100	33.3	0.68	0.018	100	864.2	2.079	0.01
EAD (EN rule)	100	17.4	2.001	0.594	100	8.18	0.502	0.097	100	69.47	1.563	0.238
EAD (L_1 rule)	100	14.11	2.211	0.768	100	6.066	0.613	0.17	100	40.9	1.598	0.293

Bảng 4.2: So sánh các tấn công trên các tập dữ liệu MNIST, CIFAR10 và ImageNet. ASR là tỷ lệ tấn công thành công (%). Giá trị nhiều trong bảng đo được trên giá trị trung bình của các mẫu thành công. EAD, C&W và I-FGM- L_∞ thu được các mẫu ít nhiễu nhất trên các chuẩn L_1, L_2, L_∞ tương ứng. Kết quả đầy đủ được báo cáo trong tài liệu mở rộng.

Ở bảng 1, quá trình thuật toán tối ưu chạy để tìm ra mẫu đối nghịch cuối cùng giữa những mẫu đối nghịch thành công dựa trên hàm mất mát elastic-net trong $\{\mathbf{x}^{(k)}\}_{k=1}^I$, gọi là luật chọn elastic-net. Ngoài ra, có thể chọn mẫu đối nghịch cuối cùng sao cho L_1 nhỏ nhất, gọi là luật chọn L_1 . Hình 2 so sánh ASR và các nhiễu trung bình trên 2 luật chọn nói trên với các giá trị khác nhau trên tập dữ liệu MNIST. Cả 2 luật chọn đều cho tỷ lệ thành công ASR 100% với dải giá trị rộng. Với cùng 1 giá trị, luật chọn L_1 cho ra các mẫu đối nghịch ít nhiễu L_1 hơn so với luật chọn EN, trong khi đó lại bị trả giá nhiễu nhiều hơn ở L_2, L_∞ . Xu hướng tương tự cũng được quan sát thấy với CIFAR10 (kết quả đầy đủ với cả 2 tập dữ liệu MNIST và CIFAR có trong tài liệu mở rộng). Trong các thí nghiệm tiếp theo, nhóm tác giả báo cáo kết quả của EAD với 2 luật chọn và $\beta = 10^{-3}$, vì trên tập MNIST và CIFAR10 giá trị β làm giảm nhiễu L_1 trong khi so sánh với L_2, L_∞ với trường hợp $\beta = 0$ (nghĩa là không có hiệu chỉnh L_1).

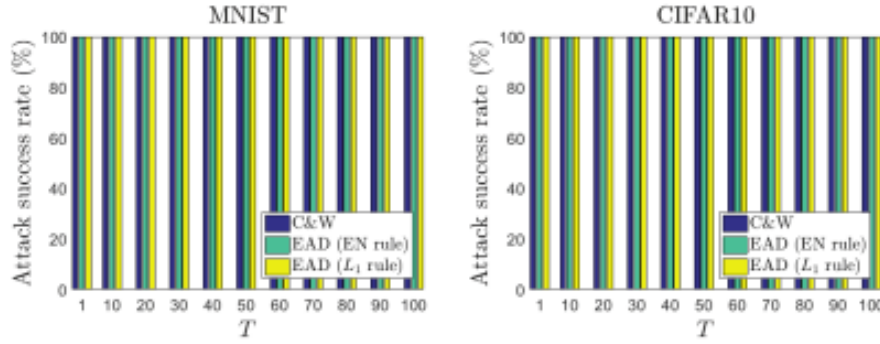
4.5 Tỷ lệ tấn công thành công và nhiễu trên các tập dữ liệu MNIST, CIFAR10 và ImageNet

Nhóm tác giả so sánh EAD với các phương pháp đối sánh trên các tiêu chí tỷ lệ tấn công thành công và các nhiễu khi tấn công mạng DNN huấn luyện bởi MNIST, CIFAR10 và ImageNet. Bảng 2 là kết quả thực nghiệm. FGM ít tấn công thành công (chỉ số ASR thấp) và chỉ số nhiễu khá lớn so với các phương pháp khác. Trong khi đó, C&W, I-FGM và EAD đều đạt ASR 100%. Ngoài ra, EAD, C&W và I-FGM- L_∞ đạt được các mẫu đối nghịch với ít nhiễu nhất lần lượt trên các chỉ số L_1 , L_2 và L_∞ . Hơn nữa, EAD tốt hơn các phương pháp L_1 hiện tại (ví dụ I-FGM- L_1). So sánh với I-FGM- L_1 , EAD với luật chọn EN giảm nhiễu L_1 xuống xấp xỉ 47% trên tập MNIST, 53% với tập CIFAR10 và 87% với ImageNet. Tác giả cũng báo cáo kết quả quan sát rằng EAD với luật chọn L_1 có thể giảm nhiễu L_1 nhưng làm tăng L_2 và L_∞ .

Mặc dù có nhiễu L_2 và L_∞ lớn, các mẫu đối nghịch tạo bởi EAD với luật chọn L_1 có thể đạt ASR 100% trên tất cả các tập dữ liệu. Nghĩa là nhiễu L_2 và L_∞ không đủ để đánh giá sức mạnh của mạng neuron. Hơn nữa, kết quả tấn công trong bảng 2 cho thấy EAD có thể thu được 1 tập phân biệt các mẫu đối nghịch khác biệt cơ bản với các mẫu dựa trên L_2 và L_∞ . Tương tự phương pháp C&W và I-FGM, các mẫu đối nghịch sinh bởi EAD đều khó phân biệt bằng mắt thường.

4.6 Phá vỡ chứng cất phòng thủ

Ngoài ra, để tấn công DNN bằng các mẫu đối nghịch, nhóm tác giả đã cho thấy EAD có thể phá vỡ DNN phòng thủ được chứng cất. Phòng thủ distillation (Papernot et al. 2016b) là công nghệ phòng thủ chuẩn mà huấn luyện lại mạng với các xác suất nhãn từng lớp được dự đoán bởi mạng gốc, nhãn mềm và tham số nhiệt T trong lớp softmax để tăng cường sức mạnh của nó chống lại nhiễu đối nghịch. Tương tự như phương thức tấn công tiên tiến C&W, hình 3 cho thấy EAD có thể thu được ASR 100% với các giá trị T khác nhau trên tập MNIST và CIFAR10. Hơn nữa, vì công thức tấn công C&W là trường hợp đặc biệt của công thức EAD trong (3.5) khi $\beta = 0$, sự thành công trong việc phá vỡ phòng thủ chứng cất sử dụng EAD gợi ý 1 cách mới trong việc tạo ra các mẫu đối nghịch hiệu quả bằng cách dùng các tham số β khác nhau cho hiệu chỉnh L_1 . Kết quả đầy đủ của tấn công ở trong tài liệu mở rộng.



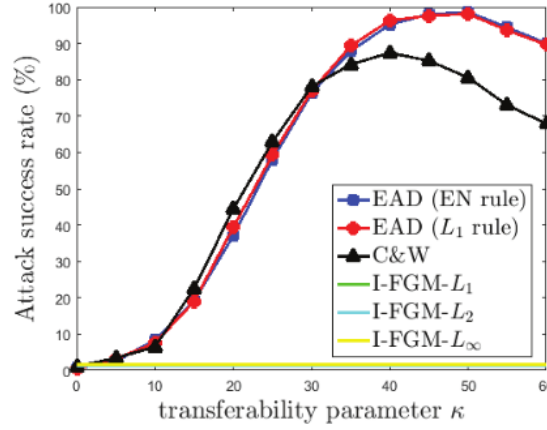
Hình 4.2: ASR của C&W và EAD trên tập MNIST và CIFAR10 với các tham số nhiệt T khác nhau cho phòng thủ distill. Cả 2 phương pháp đều phá vỡ thành công phòng thủ distill.

4.7 Cải thiện tấn công chuyển giao

Trong tài liệu (Carlini and Wagner 2017b) đã chỉ ra rằng tấn công C&W có khả năng chuyển giao tốt hơn từ 1 mạng không phòng thủ sang 1 mạng phòng thủ được cấu trúc bằng cách tối ưu các tham số độc lập κ trong (4). Theo (Carlini and Wagner 2017b), nhóm tác giả sử dụng cùng bộ tham số của tấn công chuyển giao trên tập MNIST, vì MNIST là tập dữ liệu khó nhất khi tấn công bằng nhiễu trung bình trên mỗi ảnh như trong bảng 2 ở trên.

Cố định κ , các mẫu đối nghịch được sinh ra từ mạng không phòng thủ gốc được sử dụng để tấn công mạng phòng thủ được cấu trúc với tham số nhiệt $T = 100$ (Papernot et al. 2016b). Tỷ lệ tấn công thành công (ASR) của EAD, phương pháp C&W và I-FGM được trình bày trong hình 4. Khi $\kappa = 0$, tất cả các phương pháp đều cho ASR thấp và do đó không tạo được các mẫu đối nghịch có thể chuyển giao. Tỷ lệ ASR của EAD và phương pháp C&W cải thiện khi đặt $\kappa > 0$, trong khi đó tỷ lệ ASR của I-FGM thấp (dưới 2%) do tấn công không có các tham số tương tự để có thể chuyển giao.

Chú ý rằng, EAD có thể thu được ASR gần đạt 99% khi $\kappa = 50$, trong khi đó ASR cao nhất mà phương pháp C&W đạt được là gần 88% khi $\kappa = 40$. Chứng tỏ rằng, khả năng chuyển giao tấn công tăng lên khi sử dụng các mẫu đối nghịch được tạo từ EAD, điều này là do thuật toán ISTA trong (8) mạnh hơn so với tấn công C&W qua phương pháp shrinking and thresholding. Nhóm tác giả cũng phát hiện rằng khi đặt κ quá lớn cũng làm giảm ASR của các tấn công chuyển giao cả bằng EAD và phương pháp C&W, do thuật toán tối ưu không tìm được mẫu đối nghịch có thể làm tối thiểu hóa hàm mất mát f trong (4) khi κ lớn. Kết quả đầy đủ của việc chuyển giao tấn công được báo cáo trong tài liệu kèm theo.



Hình 4.3: Khả năng chuyển giao tham số κ

4.8 Huấn luyện đối nghịch bổ sung

Để xem xét sự khác biệt giữa các mẫu đối nghịch L_1 và L_2 , tác giả kiểm tra hiệu quả huấn luyện đối nghịch trên tập MNIST. Họ chọn ngẫu nhiên 1000 ảnh từ tập huấn luyện và sử dụng tấn công C&W và EAD (luật chọn L_1) để tạo ra 9000 mẫu đối nghịch cho tất cả các nhãn sai với mỗi phương pháp. Sau đó, họ thêm vào tập huấn luyện các mẫu đối nghịch này để huấn luyện lại mạng và kiểm tra sức mạnh của nó trên tập kiểm thử, kết quả tổng hợp trong bảng 4.3. Để huấn luyện đối nghịch với 1 phương pháp nào đó, mặc dù cả 2 tấn công đều đạt tỷ lệ thành công trung bình 100%, mạng vẫn có sức chịu đựng tốt hơn trước nhiều đối nghịch vì các chỉ số nhiễu đều đã tăng lên đáng kể so với trường hợp chưa huấn luyện. Tác giả cũng quan sát thấy kết hợp huấn luyện bằng EAD và phương pháp C&W có thể làm tăng hơn nữa nhiễu L_1 và L_2 so với tấn công C&W, và tăng nhiễu L_2 so với EAD, với giả thiết rằng mẫu L_1 được tạo bởi EAD có thể được huấn luyện đối nghịch bổ sung.

Attack method	Adversarial training	Average case			
		ASR	L_1	L_2	L_∞
C&W (L_2)	None	100	22.46	1.972	0.514
	EAD	100	26.11	2.468	0.643
	C&W	100	24.97	2.47	0.684
	EAD + C&W	100	27.32	2.513	0.653
EAD (L_1 rule)	None	100	14.11	2.211	0.768
	EAD	100	17.04	2.653	0.86
	C&W	100	15.49	2.628	0.892
	EAD + C&W	100	16.83	2.66	0.87

Bảng 4.3: Huấn luyện đối nghịch sử dụng tấn công C&W và EAD (luật L_1) trên tập dữ liệu MNIST. ASR là tỷ lệ tấn công thành công. Các kết hợp L_1 example triển khai huấn luyện đối nghịch và tăng cường độ khó của tấn công về phương diện nhiễu. Kết quả đầy đủ có trong tài liệu mở rộng.

5 Kết luận

Nhóm tác giả đã đề xuất mô hình tấn công bằng hiệu chỉnh elastic-net để tạo ra các mẫu đối nghịch trong tấn công DNN. Các kết quả thực nghiệm trên các tập dữ liệu MNIST, CIFAR10 và ImageNet cho thấy các mẫu L_1 tạo bởi EAD có thể đạt được tỷ lệ thành công tương đương với các phương pháp tấn công tiên tiến dựa trên L_2 và L_∞ khi phá vỡ mạng không phòng thủ và phòng thủ chưng cất. Ngoài ra, EAD có thể cải thiện khả năng chuyển giao tấn công và huấn luyện đối nghịch bổ sung. Các kết quả của nhóm tác giả đã chứng minh hiệu quả của EAD và đưa ra hướng mới sử dụng mẫu đối nghịch L_1 trong việc huấn luyện đối nghịch và tăng cường an ninh cho DNN.