Spis treści

Rozdział 1

Steganografia

Steganografia jest dziedziną nauki poświęconą ukrywaniu informacji w jawnych kanałach komunikacji. Nazwa nauki wywodzi się z języka greckiego, i może być tłumaczona jako „ukryte pismo" (*steganós* - ukryty, *graphia* - pismo).

W celu podkreślenia cech oraz charakteru metod steganograficznych często przytaczane jest również pojęcie kryptografii. Obiektem zainteresowań kryptografii jest uniemożliwienie zrozumienia treści wiadomości przez osoby postronne, pozbawione do niej dostępu. Współcześnie jest to osiągane poprzez stosowanie klucza dzielonego przez osoby zaufane (kryptografia symetryczna) lub par kluczy publicznych i prywatnych (kryptografia asymetryczna). Dzięki ich zastosowaniu, osoba postronna pomimo dostępu do szyfrogramu nie jest w stanie wydobyć tekstu jawnego.

W odróżnieniu od kryptografii, celem technik steganograficznych jest umożliwienie uczestnikom komunikacji przesyłania informacji bez ujawniania faktu istnienia samego przekazu.

1.1 Zastosowania steganografii

Pierwszych przykładów zastosowania steganografii można doszukiwać się już w czasach starożytnych[43]. Herodotus, w swoim dziele *Dzieje* opisuje historię greckiego polityka Histiajosa, który w celu przekazania poufnej informacji wytatuował ją na skalpie zaufanego niewolnika. Gdy jego włosy odrosły, został on wysłany w

celu doręczenia listu oraz ukrytej wiadomości. Do innych przykładów steganografii można zaliczyć również ukrywanie wiadomości w zapisach nutowych, stosowanie atramentów sympatycznych lub technikę mikrokropek[43], która przeżyła swój renesans w czasach zimnej i drugiej wojny światowej.

Warto również podkreślić, że kolejnym z zastosowań steganografii są znaki wodne oraz symbole pozwalające na identyfikację źródła informacji. Za równo w przypadku multimediów objętych prawami autorskimi jak i poufnych dokumentów, ich producent lub organizacja strzegąca ich tajności może umieścić ukryte informacje pozwalające wskazać źródło wycieku[37]. Podobną technikę stosują producenci drukarek - seria oraz model drukarki może być odzwierciedlona w drukowanym dokumencie poprzez układ niewidocznych gołym okiem żółtych kropek. Takie działania mają na celu ułatwienia walki z przestępczością polegającą na fałszowaniu dokumentów i banknotów[50].

1.2 Steganografia cyfrowa

Wraz z wzrostem wykorzystania komputerów do celach multimedialnych oraz rozpowszechnieniu szerokopasmowego internetu coraz popularniejsza i bardziej opłacalna staje się steganografia cyfrowa. Jej ideą jest wykorzystanie jako medium nośnego różnych rodzajów plików komputerowych lub protokołów komunikacji cyfrowej. Przykładem wykorzystania protokołów do celów steganograficznych może być ukrywanie danych w polach kontrolnych ramek TCP/IP, kontrolowanie opóźnień między poszczególnymi pakietami lub nawet umyślne powodowanie utrat wybranych pakietów[46].

Znacznie prostszą, lecz bardzo rozwiniętą techniką jest wykorzystanie plików multimedialnych takich jak zdjęcia, pliki muzyczne i filmy. Do ich szczególnej atrakcyjności jako medium służące do ukrywania informacji przyczynia się między innymi ich wszechobecność, duże rozmiary oraz wysoka nadmiarowość[34, 45]. Ostatni aspekt w kontekście steganografii ma szczególne znaczenie, gdyż oznacza że modyfikacja pewnej części informacji bitowej zawartej w pliku ma niski wpływ na jego końcową treść. Przykładowo, zmiana wartości jednego z kanałów konkretnego piksela będzie miało mało zauważalny wpływ na końcowy obraz nawet przez uważnego obserwatora. Podobne prawidłowości można również dostrzec w plikach

muzycznych - manipulacja zawartością częstotliwości składowych będących poza granicą percepcji, czyli poniżej 20Hz i powyżej 20kHz również będzie trudna w detekcji przez subiektywnego odbiorcę[59]. Innym przykładem ukrywania informacji w muzyce jest tzw. *backmasking*, polegający na ukrywaniu wiadomości możliwych w odbiorze tylko i wyłącznie po odtworzeniu utworu od tyłu. Jednym z pierwszych zespołów przyczyniających się do wzrostu popularności powyższych eksperymentów jest *The Beatles*.

1.3 Steganografia z wykorzystaniem obrazów cyfrowych

Mimo tego, że jako medium steganograficzne można wykorzystać każdy plik binarny, szczególnie dużo uwagi zostało poświęcone cyfrowym obrazom i zdjęciom. Pomimo pozornej prostoty powyższego zadania powstało wiele wyrafinowanych metod i technik, różniących się za równo pod kątem założeń jak i rezultatów. Pierwszym parametrem mogącym służyć do podziału zaproponowanych metod jest dziedzina w której obraz zostaje poddany analizie.

1.3.1 Techniki przestrzenne

W technikach przestrzennych, obraz jest traktowany jak zbiór punktów (pikseli) umieszczonych w dwuwymiarowym układzie współrzędnych. Zaletą tych metod jest ich intuicyjność oraz przystępność, lecz są to również metody bardziej podatne na ataki polegające na wykryciu lub zniszczeniu ukrytej wiadomości[53].

Najbardziej powszechną techniką przestrzenną jest metoda *Least Significant Bit (LSB)*. Jej zastosowanie sprowadza się do zastąpienia najmniej znaczącego bitu obrazu będącego nośnikiem informacji bitem wiadomości ukrywanej. W zależności od spadku jakości który uznajemy za akceptowalny, możemy wykorzystać n najmniej znaczących bitów każdego z kanałów *RGB*. Pewnym uszczegółowieniem *LSB* jest metoda *4LSB*. Zakłada ona wykorzystanie dokładnie 4 bitów z każdego bajtu obrazu maskującego, co przekłada się na wykorzystanie 50% pojemności nośnika. Kosztem tak znacznej pojemności jest znaczący spadek jakości obrazu oraz ułatwiona steganoanaliza.

W celu zmniejszenia wykrywalności manipulacji obrazu przy jednoczesnym zachowaniu względnie dużej pojemności steganogramu, zaproponowano technikę *Variable Least Significant Bit (VLSB)*[27]. W przeciwieństwie do *LSB* podczas ukrywania danych wykorzystywana jest różna ilość bitów obrazu w zależności od położenia piksela. Nośnik zostaje podzielony na zadaną ilość sekcji, a następnie dla każdej z nich wyznaczana jest ilość bitów które zostaną zastąpione tekstem jawnym. Twórcy metody zaproponowali algorytm *Decreasing Distance Decreasing Bits Algorithm (DDDBA)*, który na podstawie odległości sektora względem piksela referencyjnego, którym najczęściej jest środkowy piksel obrazu, wyznacza proporcjonalną ilość ukrywanych bitów. Wynikiem działania algorytmu *VLSB* jest obraz, którego środkowa część jest mniej zniekształcona, co obniża subiektywne odczucie spadku jakości i pozwala na ukrycie większej ilości danych[27].

Dalszym udoskonaleniem, za równo pod kątem bezpieczeństwa ukrywanej informacji jak i utrudnienia wykrywalności ukrytego przekazu jest metoda o nazwie *Varying Index Varying Bits Substitution (VIVBS)* zaproponowana przez Sahib Khan, N. Ahmad i M. Wahid[26]. Podobnie jak w metodzie *VLSB*, ilość wykorzystanych bitów obrazu nośnego jest zmienna. W przeciwieństwie do wariantu *VLSB* opartego o algorytm *DDDBA*, ilość bitów ukrywanych w danym pikselu nie jest wyznaczana podczas działania algorytmu, lecz jest zależna od dodatkowego klucza będącego parametrem jego działania. Klucz przyjmuje postać tablicy przypisującej indeksowi każdego z pikseli ilość bitów które należy zastąpić bitami tekstu jawnego. Ponieważ ilość możliwych kombinacji rozmieszczenia bitów informacji w obrazie jest znacząca, odczytanie przekazu poprzez wykorzystanie przeszukiwania wyczerpującego poprzez osobę postronną nieposiadającą klucza będzie praktycznie niemożliwe. Główną wadą, powyższej metody jest jej również największa zaleta - klucz definiujący rozmieszczenie informacji w pikselach obrazu. Każdorazowe kodowanie informacji wymaga utworzenia klucza, od którego będzie również zależeć wpływ procesu na jakość obrazu - arbitralny wybór wysokiej ilości wykorzystanych bitów w nieodpowiednich sekcjach obrazu może przykuć uwagę osób postronnych i zdradzić fakt istnienia ukrytego przekazu. Dodatkową wadę metody jest również rozmiar klucza - w minimalnym przypadku, w którym wykorzystujemy 0 lub 1 bit każdego piksela klucz ma rozmiar $w * h$ bitów, gdzie w i h to odpowiednio szerokość i wysokość obrazu. Wraz z wzrostem ilości wykorzystywanych bitów, rozmiar

klucza również będzie się powiększał[26].

W celu poprawy subiektywnej oceny jakości obrazów oraz zmniejszenia ryzyka przekazu w roku 2003, Da-Chun Wu oraz W. Tsai zaproponowali metodę *Value Pixel Differencing (VPD)*. Jednym z jej założeń jest uzależnienie ilości wykorzystanych bitów obrazu nośnego od różnicy pomiędzy poziomami intensywności kolejnych pikseli[60]. W metodzie *VPD* piksele są odczytywane parami sekwencyjnie, zakreślając ciągły, łamany kształt. Dla każdej napotkanej pary pikseli obliczana jest ich różnica jasności, a następnie na jej podstawie wyznaczana jest ilość bitów które zostaną podmienione na treść ukrywanej wartości. Ilość ukrytych bitów jest proporcjonalna do zmiany wartości pikseli. W ten sposób możliwe jest osiągnięcie obrazów mniej podatnych na steganoanalizę przy jednoczesnym zachowaniu znacznej pojemności[60].

1.3.2 Techniki częstotliwościowe

Alternatywnym podejściem do steganografii wykorzystującej cyfrowe obrazy, są techniki oparte o częstotliwościową reprezentację obrazów. Metody te polegają na transformacji obrazu w postaci bitmapy do macierzy współczynników określających amplitudę lub natężenie fal o konkretnych częstotliwościach występujących w obrazie[9, 49].

Analiza obrazów w dziedzinie częstotliwości daje alternatywną perspektywę na treść obrazu i pozawala na rozpoznawanie, ekstrakcję i manipulację poszczególnych cech które mają odmienny wpływ na jego percepcję. Pasma niskich częstotliwości przekładają się na percepcję ogólnych kształtów i barw obiektów oraz ich kompozycję i wzajemne umiejscowienie. Pasma wysokie pozwalają na rozróżnianie ostrych krawędzi obrazów, rozpoznawanie detali oraz reprezentują wszelkie złożone tekstury[3].

Metody częstotliwościowe zyskały również na popularności w pokrewnej dziedzinie do steganografii, jaką jest oznaczanie (ang. *watermarking*) produktów cyfrowych. Za równo ukrywając dane poufne, jak i cyfrowe podpisy chroniące praw autorskich, celem metod działających w dziedzinie częstotliwościowej jest nie tylko zachowanie możliwie najwyższej jakości medium w którym zawarto dodatkowe informacje, lecz również uodpornienie ukrytego przekazu na jego manipulację i znisz-

czenie przez kompresję[55].

Jedną z transformat pozwalających na wyznaczenie częstotliwościowej reprezentacji obrazu jest *Dyskretna transformata kosinusowa (DCT)*[9]. Polega ona na podziale obrazu na bloki, najczęściej rozmiaru 8x8 pikseli. Następnie wyznaczana jest macierz współczynników $T_{i,j}$ za pomocą poniższego wzoru 1.1. N oznacza rozmiar bloku, w powszechnych zastosowaniach wynosi 8.

$$T_{i,j} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{\sqrt{N}} & \text{if } i = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} \cos\left[\frac{(2j+1)i\pi}{2N}\right] & \text{if } i > 0 \end{array} \right\} \tag{1.1}$$

W kontekście złożoności obliczeniowej istotny jest fakt, że macierz transformacji T można wyznaczyć jednokrotnie i ponownie wykorzystać dla każdego z bloków obrazu. W tym przypadku stosowane jest równanie 1.2, w którym wyznacza się macierz współczynników D korzystając z macierzy transformacji T oraz bloku wartości pikseli M przeskalowanych do zakresu $[-128, 127]$.

$$D = TMT' \tag{1.2}$$

Jednym z zastosowań dyskretnej transformacji kosinusowej jest stratna kompresja danych, przykładowo w formacie JPEG. Po wyznaczeniu współczynników odpowiadających kolejnym częstotliwościom następuje proces kwantyzacji - macierz współczynników zostaje skalarnie przemnożona przez macierz kwantyzacji a następnie zaokrąglana. Zadaniem macierzy kwantyzacji jest przeskalowanie współczynników odpowiadających zakresom częstotliwości w taki sposób, aby pasma których zmiany mają najmniejszy wpływ na subiektywną percepcję przyjęły wartości bliskie zeru. Ostatnim krokiem kompresji jest zaokrąglenie uzyskanych współczynników. Poprzez odrzucenie miejsc po przecinku wszystkich współczynników końcowy obraz charakteryzuje się dużo mniejszym rozmiarem. W celu rekonstrukcji wykonuje się transformację odwrotną (*IDCT*).

Przykładem algorytmu steganograficznego korzystającego z *DCT* jest praca *„Reversible Data Hiding in JPEG Images"*[22, 29]. Wyznaczone współczynniki częstotliwości służą za nośnik tekstu jawnego - współczynnikom z eksperymentalnie dobranych pasm częstotliwości zostają podmienione najmniej znaczące bity, podobnie jak w przestrzennych metodach *LSB*. W celu osiągnięcia dużo większej

odporności steganogramu na kompresję, Zhiqiang Zhu, N. Zheng, Tong Qiao oraz Ming Xu zaproponowali metodę opartą o manipulację znaków współczynników, w odróżnieniu do manipulacji ich wartościami[64].

Inną transformacją wykorzystywaną w steganografii jest *Dyskretna transformata falkowa* (ang. *Discrete wavelet transform (DWT)*) oraz jej odpowiednik pozwalający na bezstratną transformację odwrotną - *Całkowitoliczbowa transformata falkowa* (ang. *Integer wavelet transform (IWT)*)[61].

Jedną z możliwości transformaty falkowej jest wyodrębnienie części obrazu w której skład wchodzą osobno wysokie i niskie pasma częstotliwości. Obraz zostaje kolejno przekształcany wierszami i kolumnami przez filtr dolnoprzepustowy (wykonujący operację uśredniania) i górnoprzepustowy (obliczający różnicę).

Po pierwszej iteracji oryginalny obraz zostaje podzielony na sekcje:

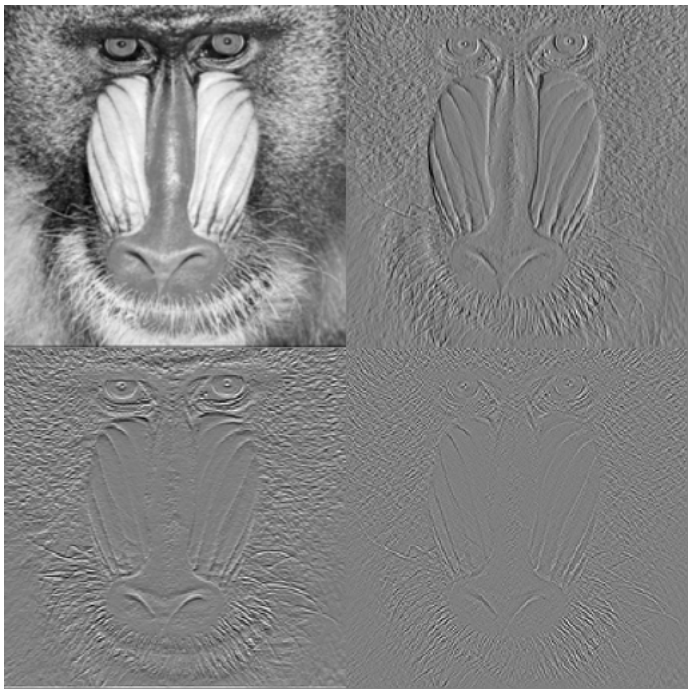
- LL - filter dolnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy i kolumn,
- LH - filter dolnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy, górnoprzepustowy dla kolumn,
- HL - filter górnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy, dolnoprzepustowy dla kolumn,
- HH - filter górnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy i kolumn.

Przykład działania *IWT* przedstawia rysunek 1.1.

W artykule *„Lossless Data Hiding Using Integer Wavelet Transform and Threshold Embedding Technique"* opisano metodę ukrywania bitów wiadomości w najmniej znaczących bitach współczynników odpowiadających pasmom wysokiej częstotliwości. Wyniki eksperymentalne, względem innych metod, wykazały znaczący wzrost pojemności obrazu przy zachowaniu tego samego współczynnika szczytowego stosunku sygnału do szumu[61].

1.3.3 Podsumowanie

Na podstawie przytoczonej literatury oraz opisanych metod, można zauważyć pewną tendencję sugerującą istotność doboru regionów obrazu w których są ukrywane dane. W opisanych pracach korzystających z transformat częstotliwościo-



Rysunek 1.1: Wynik działania *IWT* na przykładowym obrazie. Kolejno sekcje LL, HL, LH, HH. Do wykonania rysunku wykorzystano narzędzie Image Processing Online Demonstration, http://bigwww.epfl.ch/demo/ip/demos/wavelets/

wych, dokonywano wyboru pomiędzy ukrywaniem danych w niskich-średnich[23, 36, 29] lub wysokich pasmach częstotliwości[61, 35].

Główną motywacją autorów decydujących się na dobór niskich bądź średnich pasm w celach ukrywania informacji jest uzyskanie obrazu o większej odporności na manipulacje i zniekształcenia. W pracach opisujących metody wykorzystujące wysokie pasma częstotliwości, wybór jest argumentowany niższą percepcyjną wykrywalnością przez osobę postronną.

Mechanizm ludzkiej percepcji obrazów jest niezmiernie złożony a nauki z nią związane pozostają dziedzinami w których pozostaje jeszcze wiele do odkrycia i wyjaśnienia. Na postrzeganie i rozróżnianie obrazów wpływa nie tylko udział poszczególnych składowych częstotliwości, lecz również stosunek kontrastu pasm oraz sposoby uprzedniego przetwarzania obrazu[42]. Niemniej jednak, eksperymentalne badania przeprowadzane na grupie uczestników sugerują większe znaczenie niższych i średnich pasm częstotliwości przy percepcji jakości oraz zniekształceń obrazów. Dowodem tego mogą być powszechnie stosowane tablice kwantyzacji wykorzystywane w formatach stratnej kompresji, które faworyzują pasma o średniej lub niższej częstotliwości[9]. Oznacza to, że istnieje większy potencjał w manipulacjach obrazem w zakresie pasm wysokich, przy jednoczesnej zachowaniu jak najwyższej subiektywnej jakości obrazu. Istnieją prace związane z steganografią popierające powyższą tezę. Należą do nich już przytoczona w kontekście metody *PVD „A steganographic method for images by pixel-value differencing"*[60], oraz praca *„Edge-based image steganography"* oparta na wykrywaniu krawędzi obrazu[24].

Rozdział 2

Systemy mrówkowe i mrowiskowe

Systemy mrówkowe (ang. *Ant System - AS*) oraz systemy mrowiskowe (ang. *Ant Colony System - ACS*) są metaheurystykami wykorzystywanymi do rozwiązywania trudnych problemów optymalizacyjnych. Ich fundamenty wywodzą się z pracy z 1991 roku, zaproponowanej przez M. Dorgio, V. Maniezzo i A. Colorni[16]. Jej autorzy przedstawili ideę oraz zastosowania algorytmu wzorującego się na zachowaniu mrówek poszukujących pożywania. Od tego czasu przedstawiono wiele wariacji oraz ulepszeń algorytmu mrówkowego, a wiele z nich jest obecnie używanych do rozwiązywania problemów w bardzo szerokim zakresie dziedzin.

Ogólna zasada działania systemów mrówkowych opiera się na obserwacji zachowania prawdziwych mrówek eksplorujących otoczenie w celu odnalezienie pożywienia. Początkowo, każda mrówka porusza się w chaotyczny i losowy sposób przeszukuje najbliższe otoczenie mrowiska. W przypadku, w którym mrówka odnajduje pożywienie, zaczyna ona drogę powrotną do mrowiska. Podczas jej przebywania, mrówka niosąca pokarm nanosi na ścieżkę ślad feromonowy. Ma to na celu umożliwienie powrotu do obszaru w którym pokarm został znaleziony. Za równo mrówka która odniosła zdobytą żywność, jak i pozostałe mrówki w okolicy podczas swojej losowej wędrówki, zaczynają faworyzować trasy oznaczone śladem feromonowym. Jeśli na jego końcu ponownie zostanie znalezione pożywienie, na drogę powrotną zostanie nałożona kolejna jego warstwa. Końcowym efektem tego zjawiska jest efekt pozytywnego sprzężenia zwrotnego, gdyż trasy obierana przez mrówki jednocześnie stają się dla nich bardziej atrakcyjne.

Istotnym aspektem w zjawisku odkładania śladu feromonowego jest jego wyparowywanie pod upływem czasu. Jest to kluczowa właściwość, przyczyniająca się do zbieżności tras obieranych przez mrówki do optymalnej (najkrótszej) drogi prowadzącej do pożywienia. Taki stanu rzeczy może być wytłumaczony poprzez analizę ruchu większej ilości mrówek w pewnym okresie czasu. Ponieważ przebycie dłuższej ścieżki wymaga więcej czasu, średnio mniej mrówek będzie się nią poruszać w stosunku do jednostki odległości. To bezpośrednio przekłada się na mniejszą ilość odłożonego śladu oraz jego szybsze odparowanie. Pomysłodawcy systemów mrówkowych podsumowują ich ogólne właściwości wyszczególniając następujące cechy[16]:

- pozytywne sprzężenie zwrotne pozwalające na szybkie odkrywanie dobrych rozwiązań,
- rozproszony charakter obliczeń zapobiega przedwczesnej zbieżności do lokalnego minimum,
- zachłanne postępowanie każdej mrówki przyczynia się do znajdowania akceptowalnych rozwiązań w bardzo krótkim czasie.

2.1 Systemy wieloagentowe

Ponieważ systemy mrówkowe oraz mrowiskowe można zaliczyć do grupy systemów wieloagentowych (ang. *Multi Agent System - MAS*), istotne jest zrozumienie celów, trudności, zalet oraz ograniczeń tej klasy rozwiązań. Fundamentem systemów wieloagentowych jest pojedynczy agent wchodzący w interakcję z starannie zaprojektowanym środowiskiem. Pomimo braku ścisłej definicji agenta która byłaby w stanie objąć wszystkie istotne przykłady oraz zastosowania systemów, agent musi spełniać następujące kryteria[4].

- Zdolność percepcji otoczenia. Sposób postrzegania oraz zakres odbieranych informacji zależy od rozwiązywanego problemu i jest proporcjonalny do poziomu złożoności rozwiązywanego problemu.

- Autonomia. Każdy agent samoistnie dąży do realizacji swoich celów, nie wymaga interakcji z innymi agentami ani zewnętrznej ingerencji człowieka w działanie systemu.

- Responsywność i proaktywność. Agent pod wpływem bodźców odbieranych z środowiska podejmuje decyzje pozwalające przybliżające go do realizacji celu.

- Komunikacja i zachowanie społeczne. Interakcja pomiędzy osobnikami jest kluczowym elementem systemów wieloagentowych. Pomimo że osobniki są w stanie działać autonomicznie, komunikacja pozwala na dzielnie się wiedzą i zdobytym doświadczeniem, co przekłada się na szybsze dążenie do lepszych rozwiązań systemu jako całości.

- Lokalność celu. Agent nie jest w pełni świadomy stanu całego systemu, ani ostatecznego celu jego działania. Przeciwnie, agentom przydzielane jest realizacja lokalnych celów, które są dużo prostsze do osiągnięcia niż globalny cel działania całego systemu. Poprzez interakcję oraz mnogość agentów osiąganie lokalnych celów przekłada się na odkrywanie coraz to lepszych rozwiązań globalnego problemu.

Ze względu na powyższą charakterystykę oraz ogólną koncepcję systemów wieloagentowych, posiadają one wiele zalet których pozbawione są scentralizowane metody rozwiązywania problemów. Autonomia agentów pozawala na zastosowanie metodyk programowania równoległego i lepszego wykorzystania dostępnych zasobów procesora. Zapewniają również lepszą skalowalność pod kątem rozmiaru problemu - dla większych danych wejściowych możliwe jest uruchomienie większej liczby agentów zaangażowanych w rozwiązanie zadanego problemu. Lokalność i niezależność agentów pozwala na wykorzystanie rozproszonych systemów komputerowych, na przykład klastrów - to z kolej przekłada się na większą niezawodność systemów, gdyż błąd działania pojedynczego agenta nie powoduje awarii całego systemu. Rozproszone systemy wieloagentowe mają również swoje wady, należą do nich narzut komunikacji agentów który może utrudniać równoległe wykonywanie operacji, oraz brak gwarancji osiągnięcia globalnego celu[17, 4].

W związku z szerokim wachlarzem zalet, systemy wieloagentowe znajdują zastosowanie w rozległym spektrum dziedzin i aplikacji. Ich przeznaczenia można zaobserwować poczynając od modelowania problemów zbyt złożonych do klasycznej analizy, rozwiązywania zadań wyznaczania drogi, za równo w logistycznych łańcuchach zaopatrzeń jak i w trasowaniu pakietów w sieciach IP, oraz zarządzania i monitorowania systemami takimi jak sieci energetyczne lub platformy chmurowe[17, 41].

Na podstawie omówionych cech systemów wieloagentowych, możemy wysnuć wiele paralel pomiędzy nimi i systemami mrówkowymi. Pojedynczymi agentami są mrówki, które postrzegają środowisko w określony i charakterystyczny sposób dla natury problemu. Ich percepcja ogranicza się do postrzegania ich położenia, dostępnych ścieżek oraz śladu feromonowego z nimi związanym. Każda mrówka jest w pełni autonomiczna, gdyż nie wymaga dodatkowej interakcji do wykonywania działań prowadzących do realizacji lokalnego celu. Mrówki przejawiają zachowania społeczne oraz komunikują się za pomocą nanoszonego śladu feromonowego na ścieżki prowadzące do pożywienia. Dzięki tym cechom, agenci realizujący lokalne cele, czyli znalezienie pożywienia, przyczyniają się do wspólnego osiągnięcia celu globalnego, jakim jest wyznaczenie najkrótszej drogi do niego prowadzącej.

2.2 Zastosowania systemów mrówkowych

Ponieważ metaheurystyka systemu mrówkowego jest oparta o zachowanie mrówek poszukujących najkrótszej drogi do pożywienia, oczywiste zdają się być próby zaaplikowania jej do problemu komiwojażera, znanego w anglojęzycznej literaturze jako *Travelling Salesman Problem - TSP*. Zadaniem postawionym przed algorytmem poszukującym rozwiązania *TSP* jest znalezienie najkrótszej drogi łączącej wszystkie n miast, w taki sposób że każde miasto zostanie odwiedzone jednokrotnie. Problem komiwojażera jest problemem *NP trudnym*, a asymptotyczna złożoność algorytmu przeszukiwania wyczerpującego wynosi $O(n!)$. *TSP* zawdzięcza swoją popularność prostocie jego opisu, będącej w opozycji do trudności realizacji jego rozwiązania. Jego pierwsza formalna definicja została przedstawiona przez matematyka K. Mengera w roku 1930[32]. Od tego czasu naukowcy z wielu dziedzin starali się zaproponować algorytmy i heurystyki pozwalające na znalezienie

dobrych rozwiązań w czasie wielomianowym. Pomimo braku sukcesu w odkryciu algorytmu pozwalającego na znalezienie optymalnego rozwiązania w czasie wielomianowym, poczyniono istotny postęp w tworzeniu algorytmów skupionych na odkrywaniu akceptowalnych rozwiązań w krótszym czasie.

Jednym z najważniejszych przełomów w badaniach *TSP*, był algorytm zaproponowany przez N. Christofides w roku 1976. Odkryte rozwiązanie gwarantuje znalezienie drogi nie dłuższej od optymalnej o 50% w czasie $O(n^3)$[11]. Od tego czasu, powstawało wiele alternatywnych rozwiązań, lecz żadne z nich nie zdołało obniżyć górnej granicy długości drogi w znaczący sposób.

Alternatywnym podejściem do problemu komiwojażera oraz innych problemów z klasy *NP trudnych*, które zyskało na popularności jest stosowanie metaheurystyk, czyli ogólnych schematów i metod przeznaczonych do rozwiązywania szerokiej gamy problemów algorytmicznych. Metaheurystyki są najczęściej inspirowane systemami występującymi w naturze, i dają dobre rezultaty w problemach optymalizacyjnych problemów o charakterze losowym i dynamicznym[5]. Do najszerzej stosowanych należą symulowane wyżarzanie (ang. *Simulated Annealing*)[28], algorytmy genetyczne (ang. *Genetic Algorithms*)[19], metody optymalizacji cząsteczkowej (ang. *Particle swarm optimization*)[44] oraz opisywane w tym rozdziale systemy mrówkowe o mrowiskowe. Wszystkie z wymienionych metod były wykorzystywane w rozwiązywaniu problemu komiwojażera[47, 32].

Pomimo niesprzecznej wagi i istotności *TSP*, systemy mrówkowe i mrowiskowe znalazły zastosowanie w wielu innych problemach. Kluczowym etapem decydującym o możliwości i efektywności rozwiązania zadanego problemu przez system mrówkowy lub mrowiskowy jest wyznaczenie jego odpowiedniej reprezentacji grafowej[16]. Dodatkową zaletą wynikającą z zastosowania tego rodzaju metaheurystyki jest możliwość rozwiązywania problemów dynamicznych, w których warunki ulegają zmianom w trakcie pracy algorytmu. Do problemów rozwiązywanych przez systemy mrówkowe możemy zaliczyć między innymi:

- kwadratowe zagadnienie przydziału (ang. *quadratic assignment problem*)[31, 20],
- harmonogramowanie (ang. *scheduling*)[12, 33],
- marszrutyzacja (ang. *vehicle routing problem*)[8],

- trasowanie w sieciach (ang. *routing*)[10, 6].

2.3 Zasada działania

Ponieważ zachowanie mrówek poszukujących najkrótszej ścieżki do pożywienia najłatwiej i najbardziej intuicyjnie jest analizować w odniesieniu do problemu komiwojażera, zdecydowano się stosować słownictwo oparte o problem poruszania się po mapie złożonej z miast połączonych drogami o znanej długości. Ważne jest jednak mieć na uwadze fakt, że jest to tylko przykład dydaktyczny, a działanie algorytmu można równie trafnie opisać posługując się pojęciami grafu, wierzchołków i krawędzi je łączących.

Pierwszym etapem algorytmu jest umieszczenie mrówek na mapie oraz inicjalizacja struktury reprezentującej ślad feromonowy. Mrówki są przydzielane do miast w losowy sposób, a ślad jest inicjowany wartością τ_0. Każda z mrówek inicjalizuje strukturę służącą do przechowywania informacji o uprzednio odwiedzonych miastach. Zostaje do niej swoje miasto początkowe. Następnie każda mrówka wybiera drogę prowadzącą z bieżącego miasta i do kolejnego miasta j, pod warunkiem że miasto j nie zostało już odwiedzone. Prawdopodobieństwo każdego przejścia w kroku t jest określone funkcją $P_{ij}(t)$. Po wykonaniu pojedynczego kroku przez każdą mrówkę, może nastąpić następuje proces nakładania śladu feromonowego. Natężenie nakładanego śladu jest określone za pomocą funkcji $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$. Proces wyboru kolejnego miasta i nanoszenia śladu feromonowego jest powtarzany aż do momentu w którym mrówki odwiedziły już wszystkie miasta, lub został osiągnięty warunek końcowy. Po zakończeniu iteracji, która w przypadku zadań polegających na odwiedzeniu wszystkich miast nazywana jest cyklem, następuje naniesienie śladu feromonowego. Algorytm jest wykonywany do momentu realizacji ustalonej liczby iteracji lub braku poprawy rozwiązania[16].

Ogólna postać algorytmu może zostać podsumowana w następujący sposób:

1. Umieść mrówki na wierzchołkach grafu.

2. Każda mrówka dokonuje wyboru kolejnego nieodwiedzonego miasta zgodnie z ustaloną funkcją prawdopodobieństwa $P_{ij}(t)$.

3. Aktualizuj ślad feromonowy za pomocą funkcji $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$.
4. Powtórz kroki 2-3 do momentu odwiedzenia wszyskich wierzchołków przez każdą mrówkę
5. Aktualizuj ślad feromonowy za pomocą funkcji $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$.
6. Powtórz kroki 1-5.

2.4 Rodzaje systemów mrówkowych

Pomysłodawcy systemów mrówkowych, M. Dorgio, V. Maniezzo i A. Colorni, zaproponowali trzy wariacje systemu. Każda z nich różni się pod kątem sposobu aktualizacji śladu feromonowego. Są to modele *Ant Density*, *Ant Quantity* oraz *Ant cycle*. W dalszych częściach pracy pozwolono sobie stosować odpowiednio nazwy modelu o feromonie stałym, średnim oraz cyklicznym.

Cechą wspólną powyższych modeli jest metoda wyboru krawędzi w kroku t. Prawdopodobieństwo, że mrówka znajdująca się w wierzchołku i wybierze krawędź prowadzącą do wierzchołka j jest określona następującym wzorem 2.1.

$$P_{ij}(t) = \begin{cases} 0 & j \notin J \\ \frac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}[\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum_{j \in J}[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}[\eta_{ij}]^{\beta}} & j \in J \end{cases} \tag{2.1}$$

gdzie

- J jest zbiorem wierzchołków połączonych krawędzią z wierzchołkiem i, które nie zostały jeszcze odwiedzone przez mrówkę podejmującą decyzję,
- $\tau_{ij}(t)$ jest natężeniem śladu feromonowego krawędzi pomiędzy wierzchołkami i i j w kroku t,
- η_{ij} jest współczynnikiem widoczności wierzchołka j z perspektywy wierzchołka i. Jego wartość jest obliczana jako odwrotność długości krawędzi $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$,
- α i β są współczynnikami pozwalającymi kontrolować istotność śladu feromonowego względem widoczności.

Ogólną zasadę śladu feromonowego aktualizacji wyraża wzór 2.2. Współczynnik ρ jest odpowiedzialny za wyparowywanie śladu, co chroni przez nieskończoną jego akumulacją. Istotne jest, aby jego wartość była dodatnia, lecz mniejsza niż jeden $0 < \rho < 1$. Wartość $1 - \rho$ mianuje się współczynnikiem wyparowania.

$$\Delta\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+1) \tag{2.2}$$

To co rozróżnia opisywane metody, jest reguła wyznaczania przyrostu śladu feromonowego $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$.

2.4.1 Model feromon stały

W przypadku modelu o feromonie stałym, przyrost jest stałą wartością Q dla krawędzi którą mrówka zdecyduje się przebyć w drodze pomiędzy wierzchołkami i i j. Po zakończeniu kroku lub cyklu, wartości te są sumowane dla każdej z m mrówek - jeśli krawędź została przemierzona przez więcej niż jedną mrówkę, przyrost śladu feromonowego będzie proporcjonalnie większy i jest wyrażony wzorem 2.3.

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^{m} \begin{cases} Q & (i,j) \in V_k \\ 0 & w\ przeciwnym\ wypadku \end{cases} \tag{2.3}$$

gdzie V_k jest krawędzią wybrana przez k mrówkę w kroku t.

2.4.2 Model feromon średni

W modelu o feromonie średnim (*Ant Quantity*), przyrost śladu feromonowego jest odwrotnie proporcjonalny do długości krawędzi łączącej wierzchołki2.4. Powoduje to dodatkowe faworyzowanie widoczności przy wyborze krawędzi, gdyż krótsze krawędzie będą stawać się bardziej atrakcyjne dla innych mrówek.

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^{m} \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}} & (i,j) \in V_k \\ 0 & w\ przeciwnym\ wypadku \end{cases} \tag{2.4}$$

2.4.3 Model feromon cykliczny

Ostatnim zaproponowanym wariantem systemu mrówkowego jest model feromonu cyklicznego (*Ant Cycle*). Różni się on znacząco od poprzednich, gdyż feromon jest aktualizowany jednokrotnie w każdej iteracji algorytmu, a nie po każdorazowym kroku. Wyznaczenie nowego śladu następuje po n krokach, gdzie n jest długością cykli pokonywanych przez mrówki. Przyrost śladu feromonowego $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$ jest obliczany dla każdej krawędzi trasy pokonanej przez każdą z m mrówek, i jest odwrotnie proporcjonalny do długości całej trasy. Uzasadnieniem takiego postępowania jest intuicja mówiąca, że znajomość globalnej oceny trasy (jej długości) pozwoli lepiej ocenić każde z należących do niej kroków. Regułę obliczania przyrostu śladu wyraża wzór 2.5. L_k oznacza zbiór krawędzi należących do trasy pokonanej przez mrówkę k.

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+n) = \sum_{k=1}^{m} \begin{cases} \frac{Q}{||L^k||} & (i,j) \in L_k \\ 0 & w\ przeciwnym\ wypadku \end{cases} \tag{2.5}$$

Twórcy powyższych algorytmów z powodzeniem przeprowadzili eksperymenty, których celem było zbadanie ich efektywności w rozwiązywaniu problemu komiwojażera. W przypadku każdego z modeli osiągnięto zadowalające wyniki, lecz najszybszą zbieżność do optymalnych rozwiązań zaobserwowano w modelu z feromonem cyklicznym. Podczas eksperymentów, autorzy uzyskali ówcześnie znane najlepsze rozwiązanie *TSP* dla zbioru Oliver30, lecz nie odnieśli sukcesu w problemach większego rozmiaru - Eilon50 i Elion75. Jednakże, w artykule wyraźnie podkreślono, że osiągnięcie najlepszych wyników w problemie komiwojażera nie było głównym celem pracy, a problem ten został wybrany jedynie w celach dydaktycznych i porównawczych. Zwrócono jednocześnie uwagę na istotność procesu doboru parametrów algorytmu, takich jak ilość mrówek i współczynnik wyparowania śladu feromonowego. Zaobserwowano, że dla większości rozwiązywanych problemów osiągano najlepsze rezultaty gdy ilość mrówek m jest zbliżona do ilości wierzchołków n grafu reprezentującego problem. Dla wariantu algorytmu z feromonem cyklicznym, najlepsze rezultaty osiągano dla współczynnika odparowania $(1-\rho)$ bliskiemu 0.5, i wartości α i β będących w stosunku $\frac{\beta}{\alpha}$ zbliżonym do zakresu $[2.5, 5]$ [16].

2.4.4 System mrowiskowy

Znaczącym krokiem naprzód, w dziedzinie algorytmów mrówkowych, jest system mrowiskowy zaproponowany przez M. Dorigo, jednego z twórców systemów mrówkowych, oraz L. Gambardella w roku 1997[13]. Tym razem, głównym celem pracy było opracowanie zmodyfikowanej wersji algorytmu która mogłaby konkurować z najlepszymi znanymi algorytmami służącymi do rozwiązywania problemu komiwojażera o dużym rozmiarze wejściowym.

Bazując na doświadczeniu i wynikach eksperymentów przeprowadzonych za pomocą klasycznych systemów mrówkowych, zaproponowano wprowadzenie trzech istotnych zmian w zakresie działania algorytmu.

- Rozszerzenie reguły wyboru krawędzi łączącej miasta i i j o dwa tryby działania - eksplorację i eksploatację. Wybór pomiędzy trybem działania jest czyniony na podstawie wartości zmiennej losowej q przyjmującej wartości z zakresu $[0, 1]$. Jeśli jej wartość jest mniejsza bądź równa wartości parametru algorytmu q_0, mrówka wybierze krawędź maksymalizującą wartość iloczynu widoczności i natężenia śladu feromonowego - jest to strategia eksploatacji. W przeciwnym razie, kolejne miasto s zostanie wybrana zgodnie z funkcją prawdopodobieństwa zbliżoną do zaproponowanej w systemie mrówkowym. Wzór opisujący wybór kolejnego miasta określa wzór 2.6.

- Wprowadzanie globalnej reguły aktualizacji śladu feromonowego, która jest aplikowana po zakończeniu każdego cyklu algorytmu. Jest to rozszerzenie wariantu systemu mrówkowego typu *Ant cycle*, z tą różnicą że aktualizacji podlegają jedynie krawędzie należące do najlepszej znalezionej trasy. Wpływ na istotność przyrostu śladu jest zależny od osobnego współczynnika odparowania α oraz długości najdłuższej trasy L_{gb}. Zależność tą wyraża wzór 2.7 i 2.8.

- Usprawnienie lokalnej reguły aktualizacji śladu feromonowego. Według eksperymentów, globalna regułą nie nie jest wystarczająca w zapewnianiu akceptowalnych rezultatów. Autorzy testowali różne metody wyznaczania wartości przyrostu śladu feromonowego, w tym metody czerpiące inspirację z

wzmacnianych metod uczenia maszynowego *Q learning*[58], lecz dobre rezultaty osiągnięto stosując prostszą regułę opisaną wzorem 2.9 oraz 2.10. Wartość ρ jest współczynnikiem wyparowania niezależnym od α, a V_k oznacza krawędź wybraną przez mrówkę k.

$$s = \begin{cases} argmax_{u \in J}\{\tau_{ij}\eta_{ij}^{\beta}\} & q \leq q_0 \\ \frac{\tau_{ij}\eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{j \in J}\tau_{ij}\eta_{ij}^{\beta}} & w\ przeciwnym\ wypadku \end{cases} \tag{2.6}$$

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\alpha) \cdot \tau_{ij}(t) + \alpha \cdot \Delta\tau_{ij}(t, t+n) \tag{2.7}$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+n) = \begin{cases} \frac{1}{L_{gb}} & (i,j) \in L_{gb} \\ 0 & w\ przeciwnym\ wypadku \end{cases} \tag{2.8}$$

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t, t+1) \tag{2.9}$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^{m} \begin{cases} \tau_0 & (i,j) \in V_k \\ 0 & w\ przeciwnym\ wypadku \end{cases} \tag{2.10}$$

Autorom udało się dowieść, że zaproponowany system mrowiskowy jest w stanie osiągać równie dobre, lub w znacznej części badanych problemów również lepsze wyniki niż inne pozostałe heurystyki. W problemach o rozmiarze 75 i 100 miast, uzyskano lepsze rezultaty niż za pomocą algorytmów genetycznych, elastycznych sieci oraz symulowanego wyżarzania. Dodatkowo, autorzy zgłębili temat i osiągalne rezultaty wykorzystania heurystyki systemu mrowiskowego jako generatora tras wejściowych do algorytmów lokalnej wyczerpującej optymalizacji, takich jak *3-opt*.

2.4.5 System mrówkowy Max-Min

Alternatywnym ulepszeniem klasycznego algorytmu mrówkowego, jest system mrówkowy max-min (*Max-Min Ant System - MMAS*)[54]. Podobnie jak w przypadku pracy *Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman*

problem[13], głównym celem autorów było zaproponowanie wariantu algorytmu mrówkowego który gwarantuje lepsze wyniki dla problemów większych rozmiarów.

Autorzy zaproponowali następujące usprawnienia względem systemy mrówkowego zaproponowanego przez M. Dorgio w 1991 roku.

- Po każdej iteracji algorytmu, jedynie mrówka która przebyła najkrótszą trasę nanosi ślad feromonowy. Istnieją dwie wariacje tej zasady, według pierwszej wybierana jest najkrótsza trasa w bieżącej iteracji (ang. *iteration best*), a w drugiej wybierana jest najlepsza trasa znaleziona w całkowitym czasie działanie algorytmu. Wzór opisujący regułę aktualizacji śladu feromonowego jest analogiczny do wzoru wyznaczającego przyrost podczas globalnej aktualizacji w systemie mrowiskowym 2.8.

- W celu uniknięcia stagnacji algorytmu, polegającej na wybieraniu przez wszystkie mrówki tej samej trasy, wartości śladu feromonowego są ograniczone do wartości będących parametrami działania algorytmu $[\tau_{min}, \tau_{max}]$.

- Ślad feromonowy jest inicjalizowany wartością τ_{max}. Uzasadnieniem takiego wyboru jest skłonienie mrówek do śmielszej eksploracji nieznanych rozwiązań na początku działania algorytmu. Takie działanie początkowo zmniejsza znaczenie widoczności miast podczas wyboru krawędzi.

2.5 Podsumowanie

Pomimo obszerności powyższego porównania istniejących systemów mrówkowych i mrowiskowych, nie jest ono w żadnym stopniu wyczerpujące. Powstało wiele innych rozwiązań charakteryzujących się obiecującymi rezultatami. Należą do nich przykładowo systemy elitystyczne (ang. *Elitist Ant System - EAS*)[14] oraz systemy rankingowe (ang. *Rank Ant System - ASRank*)[7]. Jak można ocenić, dziedzina systemów mrówkowych jest wciąż aktualna w rozwiązywaniu problemów, których rozwiązania są nieosiągalne przy stosowaniu algorytmów wyczerpujących i zachłannych[15].

Rozdział 3

Zastosowanie systemów mrówkowych w steganografii

Jak przedstawiono w poprzednich rozdziałach, zagadnienia steganografii oraz systemów mrówkowych są złożone, nawet gdy są analizowane w izolacji. Obie dziedziny mogą zostać powiązane, jeśli spojrzymy na nie jako na parę problemu optymalizacji oraz metaheurystykę mogącą posłużyć do jego rozwiązania.

Wykorzystanie systemów steganograficznych jest bezpośrednio związane z jednoczesną realizacją celów stojących sobie w opozycji. Idealny system steganograficzny, niezależnie od stosowanego medium nośnego, cechuje się jednocześnie dużą pojemnością, odpornością na zakłócenia i zniekształcenia nośnika i niską wykrywalnością istnienia przekazu. Intuicyjnie, lecz również na podstawie wszelkich obserwacji, można zauważyć że jednoczesna maksymalizacja ukrywanego przekazu powoduje wzrost cech niepożądanych, takich jak wzrost podatności na ataki steganograficzne. Oznacza to, że kluczowym aspektem wszystkich metod steganograficznych jest zachowanie balansu pomiędzy realizacją tych celów. W zastosowaniach o krytycznej poufności istotniejsze będzie zapewnienie niższej wykrywalności, nawet jeśli się odbędzie kosztem stosunku wiadomości do sygnału. W zależności od wybranej metody, kontrolowanie tego balansu może się to sprowadzać do regulacji parametrów algorytmu lub wyboru nośnika o odpowiednio dużym rozmiarze.

3.1 Zastosowanie metod heurystycznych w steganografii

Trudności związane z optymalizacją procesu nie oznaczają, że należy zaniechać poszukiwań metod pozwalających na zachowanie zadowalającego poziomu każdego z parametrów procesu. W rzeczywistości, zagadnienie wykorzystania metaheurystyk oraz metod uczenia maszynowego do celów steganografii jest aktywną dziedziną odnoszącą ciągłe sukcesy[18, 63, 25, 51, 29]. Jednym z aspektów przemawiających na korzyść stosowania metod heurystycznych do celów steganograficznych jest ich stochastyczny charakter. Podstawowym problemem najprostszych technik steganograficznych, takich jak *LSB*, jest sekwencyjność wyboru fragmentów nośnika informacji. W przypadku ukrywania informacji w obrazach, najoczywistszym działaniem jest kodowanie danych w kolejnych pikselach obrazu. Takie podejście jest wyjątkowo wrażliwe na najprostsze formy ataków, za równo steganograficznych jak i statystycznych. W celu uniknięcia powyższej podatności, możliwe jest stosowanie dodatkowych kluczy instruujących, które i w jakiej kolejności segmenty nośnika należy analizować[2]. Wykorzystanie stochastycznych procesów które zachodzą w znacznej części metaheurystyk, automatycznie rozwiązuje problem przewidywalności umiejscowienia informacji. Gwarantuje również możliwość powtarzalnego odtworzenia jego działania poprzez ustalanie ziarna generatora liczb losowych. W takim przypadku, jego wartość stanowi swoisty klucz zwiększający bezpieczeństwo ukrytych danych. Dodatkowym argumentem przemawiającym za słusznością wykorzystania klucza w metodach steganograficznych, jest słynna zasada Kerckhoffsa[21], będąca fundamentem współczesnej kryptografii. Jej treść głosi, że bezpieczeństwo systemu powinno zostać zachowane, nawet jeśli osoba próbująca odkryć poufne informacje zna wszystkie szczegóły jego działania. Gwarantem bezpieczeństwa musi być prywatny klucz. Zasada ta stoi w opozycji do systemów opierających się na niejawności *(ang. Security by obscurity)*.

3.1.1 Systemy mrówkowe w steganografii

W związku z zaletami metod heurystycznych, oraz nadziejami na znalezienie sposobu optymalizacji przeciwstawnych cech steganogramów, próby wykorzystania

systemów mrówkowych i mrowiskowych do ukrywania danych w obrazach były niejednokrotnie podejmowane[48, 62, 25]. Najważniejszym aspektem charakteryzującym każdą z opisanych metod jest sposób reprezentacji problemu. W celu zastosowania metaheurystyki systemu mrówkowego, konieczne jest przedstawienie danych wejściowych w postaci grafu. Wybór dotyczący zasady jego budowy ma fundamentalny wpływ na uzyskiwane rezultaty oraz efektywność algorytmu. Kolejnym kluczowym zagadnieniem jest interpretacja rezultatów pracy wirtualnych mrówek. W tej kwestii istnieją conajmniej dwie obierane ścieżki przez eksperymentatorów. Za wynik działania algorytmu można uznać najkrótszą bądź najpopularniejszą ścieżkę obieraną przez mrówki - takie podejście oznacza pozyskanie dyskretnej listy wykorzystanych krawędzi. Alternatywnie, jako rezultat można uznać utworzony ślad feromonowy. Korzystając z tego podejścia, utrzymujemy rozmyty zbiór krawędzi reprezentujących najlepszą ścieżkę - krawędzie częściej należące do krótszych rozwiązań problemu komiwojażera będą bardziej do niego należeć niż ścieżki rzadko obierane. Analiza rozmytego zbioru rozwiązań pozostawia szerszą możliwość interpretacji wyników. Dodatkowo, charakterystyka uzyskiwanego śladu feromonowego jest bardziej podatna na zmiany rodzaju systemu mrówkowego oraz jego parametry.

Systemy mrowiskowe mogą zostać wykorzystane za równo w steganografii przy pomocy obrazów cyfrowych w dziedzinie przestrzennej[62, 25], jak i częstotliwościowej[48]. W artykule *„High capacity and optimized image steganography technique based on ant colony optimization algorithm”*, zaproponowano metodę opartą o przytoczoną metodę całkowitoliczbowej transformaty falkowej (IWT). Twórcy opisali algorytm wykorzystujący system mrowiskowy do ukrycia sekretnej informacji w współczynnikach dziedziny transformaty. Przeprowadzone eksperymenty wykazały wysoką skuteczność metody[48].

Pomimo że pozostałe przestudiowane prace oparte są o analizę obrazu w technice przestrzennej, sposób reprezentacji problemu i interpretacji wyników jest zdecydowanie odmienny. W pracy *„Ant Colony Optimization To Enhance Image Steganography”*[62], obrazy zostały podzielone na bloki o rozmiarach 2×2 lub 5×5. Każdy blok jest interpretowany jako graf, w którym wierzchołkami są piksele, a długościami krawędzi są odwrotności błędu średniokwadratowego spowodowanego przez ukrycie w danym pikselu jednego bitu informacji. Uzyskana przez

system mrówkowy ścieżka wskazuje, w których pikselach należy umieścić informację aby uzyskać najmniejszy wpływ na różnicę między obrazem nośnym a stganogramem[62].

Przykładem pracy wykorzystującej wartości śladu feromonowego naniesionego przez mrówki jest *„Ant Colony Optimization (ACO) based Data Hiding in Image Complex Region"*[25]. W powyższej pracy, mrówki poruszają się po grafie zbudowanym na podstawie bitmapy nośnej. Jego wierzchołkami są piksele, a długościami krawędzi różnice intensywności pikseli przez nie łączone. Dążeniem stosowania takiej reprezentacji jest wykrycie krawędzi oraz złożonych obszarów obrazu, pozwalających na ukrycie większej ilości informacji przy jednoczesnej niższej wykrywalności ingerencji w obraz. Po ukończeniu pracy systemu mrowiskowego, ustalana jest wartość graniczna feromonu, dla której piksele uznawane są za należące do złożonego segmentu. W ten sposób, obraz zostaje podzielony na dwa zbiory pikseli, w tych związanych z wartością feromonu przekraczającą wartość graniczną zostaje stosowana technika *LSB*. Pozostałe piksele pozostają niezmienione. Za pomocą wyników eksperymentów udaje się dowieźć, jest to skuteczna metoda. Jej dodatkową zaletą jest możliwość parametryzacji i zmiany sposobu wyznaczania granicznej wartości feromonu, co pozwala na kontrolę pojemności steganogramu kosztem jakości[25].

3.2 Zaproponowana metoda

Przytoczone i opisane metody udowadniają użyteczność i skuteczność wykorzystania systemów mrówkowych w celach steganograficznych. Jednocześnie, przegląd dostępnej literatury sugeruje że nie jest to temat wyczerpany, a jego dalsza eksploracja jest możliwa i niesie nadzieję na odkrycie metod jeszcze lepszych pod kątem pojemności steganogramu i niższej postrzegalności przekazu. Poniżej przytoczono główne założenia i idee dwóch badanych metod wykorzystujących systemy mrówkowe i mrowiskowe do ukrywania informacji w obrazach w celu zapewnienia możliwie najwyższej jakości steganogramu i jego pojemności.

3.2.1 Założenia

Pierwszą decyzją podjętą podczas projektowania rozwiązania problemu było zdecydowanie się na wykorzystanie sekcji obrazów cechujących się większą złożonością, takich jak krawędzie i zróżnicowane tekstury. Istniejąca literatura z dziedziny steganografii sugeruje wyższą podatność na manipulację w takich właśnie obszarach przy zachowaniu jednoczesnej niskiej postrzegalności istnienia przekazu. Przykładem powszechnie przyjętej techniki opartej o powyższą tezę jest opisana w rozdziale 1 metoda *Value Pixel Differencing (VPD)*[60], polecająca na uzależnieniu ilości wykorzystanych bitów od miary różnicy sąsiadujących pikseli. Poparcia powyższej tezy można również szukać w przykładach metod opartych o dziedzinę częstotliwościową obrazu[61].

Na podstawie uzyskanych sekcji obrazu umiejscowionych na spektrum stopnia złożoności, można dokonać procesu ukrywania danych w sposób faworyzujący złożone grupy pikseli. Trafną analogią do wykorzystanej metody jest technika *Variable Significant Bit (VLS)*, będąca rozwinięciem *Least Significant Bit (LSB)* o zmienność ukrywanej informacji w każdym z pikseli. W zaimplementowanym rozwiązaniu, stopień przynależności do złożonego obszaru determinuje ilość bitów obrazu nośnego które zostaną zastąpione bitami ukrywanej informacji. Motywacją reprezentacji obszarów złożonych obrazu jako zbiór rozmyty, odróżniającą ją od dyskretnej metody opisanej w pracy *„Ant Colony Optimization (ACO) based Data Hiding in Image Complex Region"*[25], jest jej większy potencjał na uzyskanie dużej pojemności steganogramu. Decydując się na binarny podział obrazu, ograniczamy się do dwóch różnych ilości ukrywanych bitów, w szczególnym przypadku opisanym w przytoczonej pracy ilość wykorzystanych bitów w obszarach nie złożonych wynosił zero. Wadą takiego podejścia, jest niemożliwość wyróżnienia i przez to efektywnego wykorzystania obszarów o średniej złożoności. Umiejscowienie złożoności na ciągłej skali, pozwala skuteczniej podejść do problemu wyznaczania ilości bitów ukrytych w konkretnym pikselu obrazu. W takim podejściu, nie tylko jesteśmy w stanie wykorzystać większą liczbę pikseli, lecz również uzyskany steganogram może cechować się niższą wykrywalnością, gdyż obszary w których ukryto dane nie są oddzielone ostrą krawędzią od pozostałych sekcji obrazu.

3.2.2 Zastosowanie optymalizacji mrowiskowej

Etapem procesu, w którym zdecydowano się wykorzystać system mrówkowy jest rozwiązanie problemu oceny złożoności obszarów obrazu. W kontekście opisywanej metody, jest to kluczowe zagadnienie całego procesu, gdyż od niego zależy czy informacje zostaną ukryte w sposób utrudniający ich wykrycie i maksymalizujący pojemność steganogramu. Zaproponowane podejście polega na wykorzystaniu pewnej transformacji obrazu nośnego do postaci grafowej, przeprowadzeniu zadanej ilości iteracji systemu mrówkowego, odczytaniu i odpowiedniej interpretacji pozostawionego śladu feromonowego. Etap interpretacji śladu feromonowego jest ściśle związany z wybraną metodą transformacji obrazu do postaci grafowej, lecz jego ostatecznym celem jest uzyskanie macierzy maskującej o wymiarach odpowiadających wymiarom obrazu nośnego. Wartości współczynników uzyskanej macierzy posłużą do wyznaczenia ilości bitów każdego z pikseli które zostaną zamienione na bity ukrywanej wiadomości. Działanie zaproponowanego algorytmu można podsumować w następujących krokach:

1. Wyznacz grafową reprezentację obrazu nośnego.
2. Wykonaj n iteracji systemy mrówkowego o zadanych parametrach.
3. Odczytaj ślad uzyskany feromonowy.
4. Na podstawie śladu utwórz macierz maskującą K_{xy} o wymiarach obrazu nośnego.
5. W każdym z pikseli zastąp k_{xy} najmniej znaczących bitów bitami informacji.

Proces wydobywania wiadomości zakodowanej w obrazie jest analogiczny do procesu jej ukrywania. W celu odczytania wiadomości należy ponownie wygenerować macierz maskującą i sekwencyjnie odczytać dyktowane przez nią ilości bitów obrazu.

Zastosowanie systemu mrówkowego niesie z sobą dodatkową zaletę w dziedzinie bezpieczeństwa. Uzyskany ślad feromonowy, a co za tym idzie macierz maskująca, jest zależny od i bardzo wrażliwy na zmiany wartości parametrów systemu mrówkowego. Dzięki temu, w hipotetycznym przypadku przejęcia steganogramu przez

osobę postronną i stwierdzeniu samego faktu istnienia ukrytej wiadomości, odczytanie jej treści będzie znacząco utrudnione. Oznacza to, że parametry systemu mrówkowego stanowią formę klucza.

3.3 Sposób reprezentacji problemu oraz interpretacja śladu feromonowego

Jak podkreślono w rozdziale 2 oraz powyższym podsumowaniu zaproponowanej metody, zadanie przekształcenia bitmapy do postaci grafu jest etapem niezbędnym do wykorzystania systemu mrówkowego w celu optymalizacji procesu steganograficznego. Parametry uzyskanego grafu, takie jak ilość wierzchołków i krawędzi będzie miał bezpośredni wpływ na wydajność oraz skuteczność działania całego algorytmu.

Omawiając zagadnienie grafowej reprezentacji obrazu, błędem byłoby pominięcie tematu interpretacji uzyskanego śladu feromonowego. Pomimo pozornej odrębności tych dwóch etapów, są one ściśle z sobą związane. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest fakt, że uzyskany ślad feromonowy jest przypisaniem każdej krawędzi grafu pewnej wartości liczbowej. Oznacza to, że interpretacja wartości liczbowej dla każdej krawędzi nie może być oderwana od metody, na podstawie której krawędź została utworzona, a co za tym idzie, również przypisano jej pewne znaczenie. W związku z powyższym, zaproponowane metody budowania grafów będą omówione równolegle z sposobami przekształcenia uzyskanego śladu feromonowego na macierz maskującą.

3.3.1 Metoda oparta o wierzchołki

W pierwszej opisanej metodzie graf jest (V, E) budowany począwszy od wierzchołów. Każdemu pikselowi obrazu wejściowego przypisywany jest jeden wierzchołek tworzonego grafu, co oznacza że zbiór wierzchołków V jest równoliczny zbiorowi pikseli obrazu. Krawędzie grafu E prowadzone są pomiędzy sąsiadującymi z sobą pikselami. Sąsiedztwo może być rozumiane jako czterospójne bądź ośmiospójne. Długość krawędzi E_{ij} łączącej piksele reprezentowane przez wierzchołki V_i oraz

V_j wyznaczana jest na podstawie różnicy wartości łącznej intensywności wszystkich kanałów *RGB*, opisanej wzorem 3.1. Taki sposób doboru długości krawędzi pozwoli „zachęcić" mrówki do poruszania się, a co za tym idzie odkładania śladu feromonowego, po ścieżkach łączących piksele podobne, jeśli ich długość będzie odwrotnie proporcjonalna do różnicy intensywności, lub zróżnicowane jeśli długość będzie proporcjonalna do różnicy.

$$\Delta p_{ij} = \frac{(p_i^r - p_j^r)^2 + (p_i^g - p_j^g)^2 + (p_i^b - p_j^b)^2}{255^2 * 3} \tag{3.1}$$

Tak utworzony graf, nie jest grafem pełnym. Oznacza to, że reprezentowany przez niego problem nie jest równoważny z klasycznym problemem komiwojażera. Kolejną trudnością występującą w przypadku chęci sprowadzenia tego zadania do *TSP* jest ilość wierzchołków grafu. Poszukiwanie cykli Hamiltona dla grafu o $w \times h$ wierzchołkach jest conajmniej nieefektywne, gdyż wartość iloczynu szerokości w oraz wysokości h nawet dla małych obrazów osiąga bardzo duże wartości.

W związku z tym, w celu zastosowania powyższej metody wprowadzono pewne zmiany w sposobie uruchamiania i działania systemu mrówkowego. Najważniejsza z nich polega na zrezygnowaniu z kończenia przez mrówki pełnych cykli. Zamiast tego, ilość wykonywanych kroków w każdej iteracji algorytmu jest również parametrem algorytmu. Dodatkowo, w celu usprawnienia działania algorytmu dla obrazów o dużych rozmiarach, wprowadzono możliwość generowania grafu dla obrazu przeskalowanego oraz ponownego przeskalowania macierzy maskującej do oryginalnych rozmiarów $w \times h$.

Wymusiło to również adaptację części reguł aktualizacji śladu feromonowego. Ponieważ uzyskany graf nie jest pełny, istnieje ryzyko przedwczesnego utknięcia mrówki w pozycji z której nie może wykonać kolejnego kroku, gdyż wszystkie sąsiadujące wierzchołki zostały już odwiedzone. Trasa mrówki która nie zdołała wykonać zadanej ilości kroków będzie nieproporcjonalnie krótsza od tras pozostałych mrówek, co przełoży się na jej niesłuszne faworyzowanie. Powyższym niebezpieczeństwem są dotknięte systemy, które w regule aktualizacji śladu wykorzystują długość całej trasy. Należy do nich cykliczny model systemu mrówkowego (*Ant-cycle*), system mrowiskowy oraz system max-min. W związku z powyższym, zdecydowano się uwzględnić możliwość wystąpienia niepełnych ścieżek i do równań

wprowadzono czynnik skalujący dystans trasy do zadanej ilości kroków. Przykładowo, wzór modelu cyklicznego opisanego wzorem 2.5 ma postać 3.2. $|L^k|$ oznacza ilość kroków trasy L^k, a N docelową ilość kroków zadaną podczas uruchamiania algorytmu.

$$\Delta\tau_{ij}(t,t+n) = \sum_{k=1}^{m} \begin{cases} \frac{Q}{||L^k|| * \frac{|L^k|}{N}} & (i,j) \in L_k \\ 0 & w\ przeciwnym\ wypadku \end{cases} \tag{3.2}$$

Ponieważ macierz maskująca musi posiadać wymiary identyczne z obrazem wejściowym, współczynnik na pozycji x, y musi odpowiadać pikselowi p_{xy}. W celu wyznaczenia wartości elementów macierzy, które decydują o ilości bitów które zostaną zastąpione bitami ukrywanej wiadomości, obliczając wartość współczynnika K_{xy} rozpatrywano wszystkie krawędzie wychodzące z wierzchołka grafu któremu odpowiada piksel p_{xy}.

Dylematem, który powstał podczas opracowywania powyższej metody jest decyzja dotycząca zależności pomiędzy różnicami sąsiadujących pikseli Δp_{ij} a długością krawędzi grafu. Początkowe eksperymenty wykazały wyższą skuteczność metody w której długości krawędzi są proporcjonalne do różnicy pomiędzy sąsiadującymi pikselami. Ponieważ oznacza to intensywniejsze i częstsze odkładanie feromonu na krawędziach łączących podobne piksele, musiało to zostać uwzględnione podczas tworzenia macierzy maskującej. Ilośc bitów ukrywanych w danym pikselu jest zatem odwrotnie proporcjonalna do natężenia śladu feromonowego.

W związku z powyższym, wartość K_{xy} określa wzór 3.3. A_i oznacza zbiór pikseli sąsiadujących z pikselem i.

$$K_{xy} = 255 * (1 - \frac{\sum_{j \in A_i} \tau_{ij}}{|A_i|}) \tag{3.3}$$

Rysunek przedstawia obraz wejściowy na który nałożono wartości długości krawędzi związanych z konkretnymi pikselami.

3.3.2 Metoda oparta o krawędzie

Drugim zaproponowanym podejściem jest budowanie grafu zaczynając od krawędzi. Pierwszym krokiem jego budowy jest podział obrazu wejściowego na ustaloną

liczbę segmentów, przeważnie znacznie mniejszą niż ilość pikseli bitmapy. Każdy segment obrazu jest reprezentowany przez jedną krawędź grafu. Jej długość jest uzależniona od wariancji wszystkich pikseli należących do segmentu przez nią opisaną. Podobnie jak w przypadku konstrukcji grafu na podstawie wierzchołków, długość krawędzi może być wprost lub odwrotnie proporcjonalna wartości wybranej miary, w tym przypadku wariancji. Uzasadnieniem wyboru wariancji jako miary opisującej każdy z segmentów, jest jej zdolność wyrażenia stopnia odchyleń pikseli do niego należących. Segmenty znajdujące się w złożonych obszarach obrazu będą posiadać wyższą wariancję.

Następnie, z uzyskanych krawędzi tworzony jest graf pełny. Aby było to możliwe, konieczne jest spełnienie warunku 3.4. Z tego względu, zaimplementowany algorytm jako parametr wejściowy przyjmuje jedynie docelową ilość węzłów $|V|$, a ilość krawędzi $|E|$, a co za tym idzie segmentów obrazu, jest wyznaczana automatycznie.

$$|E| = \frac{|V| * (|V| - 1)}{2} \tag{3.4}$$

Kolejno, graf zostaje wykorzystany przez system mrówkowy. Zadanie, które jest postawione przed wirtualnymi mrówkami można interpretować następująco: spośród $|E|$ wszystkich krawędzi, wskaż $|V|+1$ które pozwolą na ukrycie informacji w najbardziej złożonych obszarach obrazu. Jest to zadanie równoważne z problemem komiwojażera, przez co nie muszą być wprowadzane żadne modyfikacje algorytmu tak jak to miało miejsce w metodzie opartej o przekształcenie pikseli w wierzchołki grafu.

Uzyskany ślad feromonowy przypisuje wartość liczbową każdej z krawędzi. Aby na jego podstawie uzyskać macierz maskującą, należy nanieść na piksele należące do segmentu i wartość feromonu związaną z krawędzią E_i. Ponieważ każdy piksel jest przypisany do dokładnie jednego segmentu, wyznaczenie wartości macierzy maskującej nie jest problematyczne. Implementacja powyższej metody jest nierozerwalnie związana z podziałem obrazu na zadaną ilość segmentów. Wybór techniki nie jest wyborem oczywistym, gdyż istnieje bardzo wiele sposobów na który można takiego podziału dokonać. W związku z powyższym, zdecydowano się wykorzystać trzy różne metody, a następnie porównać ich wyniki. Do wykorzystanych metod

należą poniższe.

1. Podział obrazu na pewną ilość nie nachodzących na siebie prostokątów w osi x i y. Konieczny jest wybór takiej liczby podziałów S_x i S_y w osiach x oraz y, aby ich iloczyn był równy $|E|$. W przeciwnym razie, zbudowanie grafu będzie niemożliwe.

   Zaletą tej metody jest jej prostota i intuicyjność, lecz ma również kilka wad. W przypadku w którym wymiary bitmapy w i h nie są całkowicie podzielne przez S_x o S_y, konieczne jest zwiększenie segmentów znajdujących się na końcach utworzonych wierszy i kolumn. Inną wadą są jednolite krawędzie podziałów - co może przełożyć się na wyraźną różnicę jakości obrazu pomiędzy sąsiadującymi segmentami.

   Rysunek przedstawia wizualizację podziału obrazu powyższą metodą.

2. Segmentację obrazu można również przeprowadzić wykorzystując algorytmy grupujące. Jednym z nich jest *k-means*. Jego zastosowanie pozwala na podzielenie danych wejściowych na zadaną ilość k group elementów w sposób minimalizujący odległości pomiędzy elementami należącymi do tej samej grupy[30]. Algorytm pozwala na grupowanie obserwacji wielowymiarowych, lecz w tym przypadku zdecydowano się opisać każdy z pikseli tylko jednym atrybutem - wariancją jego ośmiu najbliższych sąsiadów. Ponieważ grupowanie nie bierze pod uwagę przestrzennego położenia pikseli, piksele należące do tej samej grupy niekoniecznie muszą do siebie przylegać.

   Na rysunku przedstawiono przykład podziału obrazu na zadaną ilość grup.

3. Ostatnią wykorzystaną metodą segmentacji obrazu jest podział na superpiksele (ang. *superpixels*). Superpiksele są grupami pikseli które cechują zbliżone wartości składowych w przestrzeni barw. Zastosowany algorytm *SLIC* polega z przestrzeni *CIELAB*[1]. Popularność superpikseli w dziedzinie przetwarzania obrazów stale rośnie, gdyż pozwalają na uchwycenie najważniejszych cech obrazu przy znacznej redukcji jego reprezentacji. To z kolej przekłada się na krótszy czas pracy algorytmów przetwarzania wizji. Ich zastosowania można doszukiwać się w rozwiązywaniu problemów identyfikacji i wyodrębniania

obiektów. W przeciwieństwie do algorytmu *k-means*, uzyskane grupy pikseli są spójne.

Rysunek przedstawia wizualizację podziału obrazu powyższą metodą.

Rozdział 4

Aplikacja steganograficzna wykorzystująca systemy mrówkowe

Rozdział 5

Wyniki eksperymentów

Aby zbadać skuteczność i efektywność metod zaproponowanych w rozdziale 3 oraz podrozdziale 3.3, postanowiono przeprowadzić pewne eksperymenty. Ich celem była walidacja fundamentalnych założeń, takich jak słuszność doboru złożonych sekcji obrazów, sprawdzenie zasadności sposobów wyznaczania reprezentacji grafowej problemu i interpretacji śladu feromonowego, numeryczna ocena degradacji jakości steganogramu oraz subiektywna opinia dotycząca postrzegalności tych zmian. Numeryczna ewaluacja degradacji jakości obrazu pozwoli odnieść uzyskane wyniki do istniejących rozwiązań oraz stwierdzić, czy zaproponowane metody mają swoje zastosowanie.

Weryfikacja polegała na przeprowadzeniu procesu ukrywania danych w bitmapach powszechnie wykorzystywanych w dziedzinie przetwarzania obrazów.

Pomimo istnienia alternatywnych zbiorów składających się z syntetycznie spreparowanych obrazów mających na celu wyszczególnienie pewnych cech[56], zdecydowano się na wykorzystanie prawdziwych zdjęć, gdyż bardziej odpowiadają one praktycznym zastosowaniom steganografii. W ich doborze kierowano się głównie ilością odniesień w tematycznie powiązanych pracach oraz bieżącymi tendencjami w kwestii wykorzystywania publicznych zbiorów obrazów[38, 39]. Ostatecznie, zdecydowano się skupić na obrazach *Mandrill (a.k.a Baboon)*, *Airplane (F-16) (a.k.a Jet)* oraz *Peppers*, które są udostępniane przez *Uniwersytet Południowej Kalifornii (USC)*[40].

Dane które ukrywano w obrazach miały postać tekstu w formacie *ASCII*, lecz

po drobnych adaptacjach metody ukrywania danych w obrazie możliwe byłoby ukrywanie dowolnych danych w postaci binarnej. W eksperymentach wykorzystano automatycznie wygenerowany tekst *Lorem ipsum* o rozmiarze $625kB$. Cechą zaproponowanej metody oraz zaimplementowanego programu jest możliwość skalowania wygenerowanej macierzy maskującej w taki sposób, aby można było umieścić zadaną ilość bitów tekstu. Pozwoli to na zbadanie degradacji jakości w zależności od objętości ukrywanego tekstu, oraz ułatwi porównanie rezultatów z innymi metodami.

Podczas przeprowadzanych eksperymentów, badano wpływ poszczególnych metod każdego z etapów procesu oraz ich parametrów. Porównywane wartości parametrów dotyczą poniższych procesów.

1. Konstrukcji grafu oraz wizualizacji śladu feromonowego.

   - Metoda oparta o wierzchołki. Jedynym parametrem jest opcjonalny parametr skalujący s_0 obraz wejściowy podczas budowania grafu oraz budowania macierzy maskującej. Jego wartości znajdują się w zakresie $[0, 1]$. Jego domyślna wartość wynosi 1, i oznacza budowanie grafu o liczbie wierzchołków równej $w \times h$.
   - Metoda oparta o krawędzie. Do jej parametrów należy algorytm segmentacji oraz docelowa liczba segmentów N_s związana z ilością krawędzi grafu. Podczas badań wykorzystano algorytmy prostego podziału na na prostokąty, algorytm k-średnich oraz algorytm *SLIC* służący do konstrukcji superpikseli.

2. Wyznaczenie śladu feromonowego przez różne rodzaje systemów mrówkowych. Do parametrów wspólnych dla każdego z wykorzystanych systemów należy:

   - ilość mrówek a, która domyślnie jest równa ilości wierzchołków grafu V,
   - liczba wykonanych cykli C
   - liczba kroków wykonywanych przez mrówki w każdej iteracji algorytmu S, dla grafów skonstruowanych na podstawie segmentacji obrazu wynosi jest ona równa ilości wierzchołków V

- preferencja względem śladu feromonowego α
- preferencja względem widoczności wierzchołka β
- początkowe natężenie śladu feromonowego τ_0
- współczynnik opisujący prędkość wyparowania śladu feromonowego ρ

Do porównanych rodzajów systemów należą poniższe odmiany. Z niektórymi z nich związane są dodatkowe parametry oraz domyślne wartości powyższych atrybutów.

- model feromon stały,
- model feromon średni,
- model feromon cykliczny,
- system mrowiskowy, który wprowadza prawdopodobieństwo eksploatacji najkrótszej krawędzi q_0 oraz ustalona parametr $\alpha = 1$,
- system max-min, który wprowadza ograniczenia wartości śladu feromonowego $[\tau_{min}, \tau_{max}]$. Ich wartości wyznaczane są za pomocą estymaty dotyczącej długości poszukiwanego cyklu. Wartość początkowa feromonu wynosi $\tau_0 = \tau_{max}$.

W celu umożliwienia porównywania jakości steganogramów, zdecydowano się skorzystać z metryk służących do porównawczej analizy obrazów. Zastosowane metryki można podzielić na dwie kategorie, obiektywne i subiektywne. Metryki obiektywne służą do wyznaczenia pewnej wartości charakteryzującej różnicę pomiędzy dwoma sygnałami. W przypadku metryk subiektywnych, ich zadaniem jest również wyznaczenie wartości numerycznej, lecz nacisk kładziony jest na korelację wartości z postrzegalnością zmian przez ludzki układ wzrokowy. Do zastosowanych metryk należą:

Błąd średniokwadratowy (ang. *Mean Square Error, MSE*). Jest jedną z najprostszych metryk służących do pomiaru różnic między obrazami. Jej wartości należą do zbioru nieujemnych liczb rzeczywistych, a wartości bliższe zeru stanowią o mniejszym spadku jakości. Do jej zalet należy prostota implementacji i możliwość optymalnej implementacji. Jedną z jej wad jest niska korelacja z postrzeganiem

różnic między obrazami przez ludzi oraz nieuwzględnianie informacji o relacji natężenia szumu do wartości sygnału. Jej wartość wyraża wzór 5.1, w którym $\overline{X}$ oznacza wartość średnią.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X}) \tag{5.1}$$

Szczytowy stosunek sygnału do szumu (ang. *Peak Signal Noise Ratio, PSNR*). Jest udoskonaleniem błędu średniokwadratowego, gdyż metryka ta uzależnia swoją wartość od maksymalnej wartości przyjmowanej przez sygnał. Oznacza to, że taka sama wartość *PSNR* odpowiada różnicom będących w proporcjonalnym do ilości informacji. Przykładowo, w przypadku *MSE* ta sama wartość będzie przekładać się na różną postrzegalność błędu w obrazie korzystającym z 8 i 24 bitów na kanał. Szczytowy stosunek sygnału do szumu rozwiązuje powyższy problem. W związku z dużym zakresem przyjmowanych wartości metryka korzysta z skali logarytmicznej. Wartościami typowymi przy analizie obrazów korzystających z 8 bitów na jeden kanał jest zakres $[30dB, 50dB]$, przy czym wyższa wartość oznacza mniejszą degradację. Wartość metryki można wyznaczyć za pomocą wzoru 5.2.

$$PSNR = 10 \cdot log_{10}\frac{MAX^2}{MSE} \tag{5.2}$$

Indeks podobieństwa strukturalnego (ang. *Structural Similarity Index, SSIM*). Zdecydowanie bardziej złożoną metryką jest *SSIM*. Jej celem jest uchwycenie złożoności i właściwości postrzegania ludzkiego systemu wzrokowego. Opiera się na założeniu mówiącym o istotności struktury obrazu w odniesieniu do postrzeganych różnic luminancji oraz kontrastu[57, 52]. Jej wartość jest zwykle normalizowana do zakresu $[0, 1]$, gdzie wartość 1 oznacza identyczność obrazów.

Bibliografia

[1] R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, Aurélien Lucchi, P. Fua, S. Süsstrunk. Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34:2274–2282, 2012.

[2] M. A. F. Al-Husainy, Diaa M. Uliyan. A secret-key image steganography technique using random chain codes. *International Journal of Technology*, 10:731, 2019.

[3] American Psyhological Association. Perception of high and low spatial frequency information in pigeons and people, 2015.

[4] P. Balaji, D. Srinivasan. An introduction to multi-agent systems. 2010.

[5] L. Bianchi, M. Dorigo, L. Gambardella, W. Gutjahr. A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. *Natural Computing*, 8:239–287, 2008.

[6] E. Bonabeau, F. Hénaux, S. Guerin, D. Snyers, P. Kuntz, G. Theraulaz. Routing in telecommunications networks with śmart ąnt-like agents. 1998.

[7] B. Bullnheimer, R. Hartl, C. Strauss. A new rank based version of the ant system: A computational study. 1997.

[8] B. Bullnheimer, R. Hartl, C. Strauss. Applying the ant system to the vehicle routing problem. 1999.

[9] K. Cabeen, P. Gent. image compression and the discrete cosine transform. College of Redwoods.

[10] G. D. Caro. Antnet: A mobile agents approach to adaptive routing. 1999.

[11] Nicos Christofides. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. 1976.

[12] Alberto Colorni, Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo, Marco Trubian. Ant system for job-shop scheduling. *STATISTICS AND COMPUTER SCIENCE*, 34, 01 1994.

[13] M. Dorigo, L. Gambardella. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 1:53–66, 1997.

[14] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*, 26 1:29–41, 1996.

[15] M. Dorigo, T. Stützle. The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications, and advances. 2003.

[16] Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo, Alberto Colorni. Ant system: An autocatalytic optimizing process technical report 91-016. 02 1999.

[17] A. Dorri, Salil S. Kanhere, Raja Jurdak. Multi-agent systems: A survey. *IEEE Access*, 6:28573–28593, 2018.

[18] Nameer N. El-Emam, Rasheed Abdul Shaheed AL-Zubidy. New steganography algorithm to conceal a large amount of secret message using hybrid adaptive neural networks with modified adaptive genetic algorithm. *J. Syst. Softw.*, 86:1465–1481, 2013.

[19] A. Fraser. Simulation of genetic systems by automatic digital computers i. introduction. *Australian Journal of Biological Sciences*, 10:484–491, 1957.

[20] L. Gambardella, É. Taillard, M. Dorigo. Ant colonies for the quadratic assignment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 50:167–176, 1999.

[21] P. Guillot. Auguste kerckhoffs et la cryptographie militaire. 2013.

[22] Fangjun Huang, Xiaochao Qu, H. J. Kim, J. Huang. Reversible data hiding in jpeg images. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 26:1610–1621, 2016.

[23] J. Huang, Y. Shi. Embedding image watermarks in dc components. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 10:974–979, 2000.

[24] S. Islam, Mangat Rai Modi, P. Gupta. Edge-based image steganography. *EURASIP Journal on Information Security*, 2014:1–14, 2014.

[25] Sahib Khan. Ant colony optimization (aco) based data hiding in image complex region. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8:379–389, 2018.

[26] Sahib Khan, N. Ahmad, M. Wahid. Varying index varying bits substitution algorithm for the implementation of vlsb steganography. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39:101 – 109, 2016.

[27] Sahib Khan, M. Yousaf, Jamal Akram. Implementation of variable least significant bits stegnography using dddb algorithm. 2011.

[28] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671 – 680, 1983.

[29] X. Li, J. Wang. A steganographic method based upon jpeg and particle swarm optimization algorithm. *Inf. Sci.*, 177:3099–3109, 2007.

[30] James B. MacQueen. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. 1967.

[31] V. Maniezzo, A. Colorni. The ant system applied to the quadratic assignment problem. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 11:769–778, 1999.

[32] A. Mazidi, Elham Damghanijazi. Meta-heuristic approaches for solving travelling salesman problem. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8:18–23, 2017.

[33] D. Merkle, M. Middendorf, H. Schmeck. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 6:333–346, 2002.

[34] Scott Mitchell. H.264 encoded digital video protection using temporal redundancy lsb steganography. 2018.

[35] P. Muhuri, Z. Ashraf, Swati Goel. A novel image steganographic method based on integer wavelet transformation and particle swarm optimization. *Appl. Soft Comput.*, 92:106257, 2020.

[36] Sunil Muttoo, Sushil Kumar. Data hiding in jpeg images. *International Journal of Information Technology (IJIT)*, 1, 07 2009.

[37] Hebah H. O. Nasereddin. Digital watermarking a technology overview. 2011.

[38] Nature. A note on the lena image. *Nature Nanotechnology*, 13, 2018.

[39] Journal of Modern Optics. On alternatives to lenna. *Journal of Modern Optics*, 64(12):1119–1120, 2017.

[40] University of Southern California. Usc database. `http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc#top`.

[41] M. Oprea. Applications of multi-agent systems. *IFIP Congress Tutorials*, 2004.

[42] Sabrina Perfetto, John D. Wilder, Dirk B. Walther. Effects of spatial frequency filtering choices on the perception of filtered images. *Vision*, 4, 2020.

[43] F. Petitcolas, R. Anderson, M. Kuhn. Information hiding-a survey. 1999.

[44] R. Poli, J. Kennedy, T. Blackwell. Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, 1:33–57, 2007.

[45] M. Pope, M. Warkentin, E. Bekkering, M. B. Schmidt. Digital steganography - an introduction to techniques and tools. *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, 30:22, 2012.

[46] Roshan Poudél. *Covert Channel and Data Hiding in TCP/IP*. 11 2019.

[47] S. Prabakaran, T. S. Kumar, J. Ramana, K. Reddy. A survey on approaches to solve travelling salesman problem. *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, 13:292–299, 2019.

[48] A. Priya. High capacity and optimized image steganography technique based on ant colony optimization algorithm. 2018.

[49] J. Reichel, G. Menegaz, M. Nadenau, M. Kunt. Integer wavelet transform for embedded lossy to lossless image compression. *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 10 3:383–92, 2001.

[50] T. Richter, S. Escher, D. Schönfeld, Thorsten Strufe. Forensic analysis and anonymisation of printed documents. *Proceedings of the 6th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security*, 2018.

[51] A. Saleema, T. Amarunnishad. A new steganography algorithm using hybrid fuzzy neural networks. *Procedia Technology*, 24:1566–1574, 2016.

[52] Umme Sara, Morium Akter, Mohammad Shorif Uddin. Image quality assessment through fsim, ssim, mse and psnr—a comparative study. *Journal of Computational Chemistry*, 7:8–18, 2019.

[53] N. Sharma, Usha Batra. An inclusive study and analysis of steganographic methodologies for data security. 2020.

[54] T. Stützle, H. Hoos. Max-min ant system. *Future Gener. Comput. Syst.*, 16:889–914, 2000.

[55] Hai Tao, Li Chongmin, J. Zain, A. Abdalla. Robust image watermarking theories and techniques: A review. *Journal of Applied Research and Technology*, 12:122–138, 2014.

[56] J. Uhlmann. A canonical image set for examining and comparing image processing algorithms. *ArXiv*, abs/1805.00116, 2018.

[57] Zhou Wang, A. Bovik, H. Sheikh, Eero P. Simoncelli. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13:600–612, 2004.

[58] Chris Watkins. Learning from delayed rewards. 1989.

[59] David Wheeler, Daryl Johnson, Bo Yuan, P. Lutz. Audio steganography using high frequency noise introduction. 2012.

[60] Da-Chun Wu, W. Tsai. A steganographic method for images by pixel-value differencing. *Pattern Recognit. Lett.*, 24:1613–1626, 2003.

[61] G. Xuan, Y. Shi, Chengyun Yang, Yizhan Zhen, D. Zou, P. Chai. Lossless data hiding using integer wavelet transform and threshold embedding technique. *2005 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, strony 1520–1523, 2005.

[62] Eman Talib Zghaer, Assist. Prof. Dr Soukaena H.Hashem. Ant colony optimization to enhance image steganography. *International Journal of Emerging Trends and Technology in Computer Science (IJETTCS)*, 6(2278-6856), 2017.

[63] Dong Zhao, L. Liu, F. Yu, A. Heidari, Mingjing Wang, D. Oliva, Khan Muhammad, Huiling Chen. Ant colony optimization with horizontal and vertical crossover search: Fundamental visions for multi-threshold image segmentation. *Expert Syst. Appl.*, 167:114122, 2021.

[64] Zhiqiang Zhu, N. Zheng, Tong Qiao, Ming Xu. Robust steganography by modifying sign of dct coefficients. *IEEE Access*, 7:168613–168628, 2019.

Spis rysunków

Spis tablic