

Spis treści

1	Steganografia	1
1.1	Zastosowania steganografii	1
1.2	Steganografia cyfrowa	2
1.3	Steganografia z wykorzystaniem obrazów cyfrowych	3
1.3.1	Techniki przestrzenne	3
1.3.2	Techniki częstotliwościowe	5
1.3.3	Podsumowanie	7
2	Systemy mrówkowe i mrowiskowe	11
2.1	Systemy wieloagentowe	12
2.2	Zastosowania systemów mrówkowych	14
2.3	Zasada działania	16
2.4	Rodzaje systemów mrówkowych	17
2.4.1	Model feromon stały	18
2.4.2	Model feromon średni	18
2.4.3	Model feromon cykliczny	19
2.4.4	System mrowiskowy	20
2.4.5	System mrówkowy Max-Min	21
2.5	Podsumowanie	22

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[34]. Herodotus, w swoim dziele *Dzieje* opisuje historię greckiego polityka Histiajosa, który w celu przekazania poufnej informacji wytatuował ją na skłapie 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[34], 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 multimediiów objętych prawami autorskimi jak i poufnych dokumentów, ich producent lub organizacja strzegąca ich tajności może umieścić ukryte informacje pozwalające wskazać źródło wycieku[31]. 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[40].

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[37].

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[28, 36]. 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[45]. 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 pozorowanej 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[41].

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)*[22]. 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[22].

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[21]. 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[21].

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[46]. 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[46].

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[7, 39].

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[1].

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-

czeniu przez kompresję[43].

Jedną z transformat pozwalających na wyznaczenie częstotliwościowej reprezentacji obrazu jest *Dyskretna transformata kosinusowa (DCT)*[7]. 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.

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

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 $[-128, 127]$.

$$D = TMT' \quad (1.2)$$

Jednym z zastosowań dyskretniej 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”[18, 24]. 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[48].

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)*)[47].

Jedną z możliwości transformaty falkowej jest wyodrębnienie części obrazu w której skład wchodzi 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:

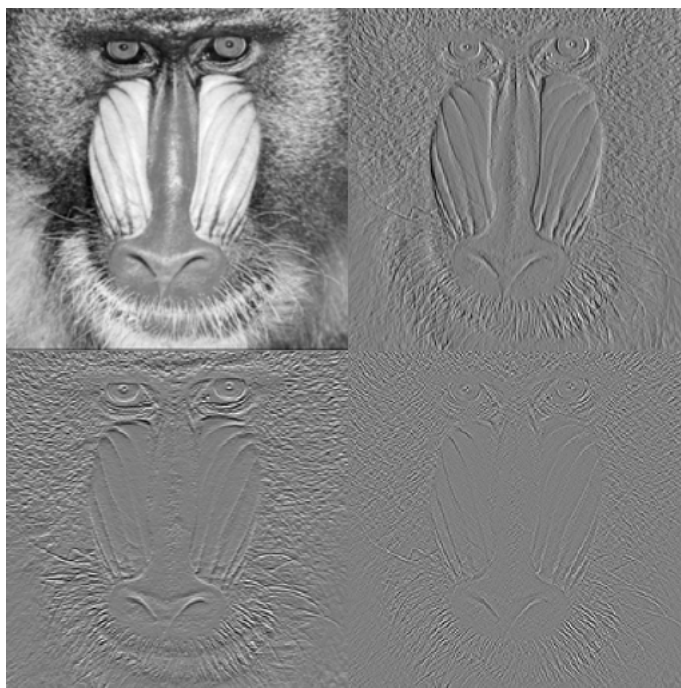
- LL - filter dolnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy i kolumn,
- LH - filter dolnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy, górnoprzepustowy dla kolumn,
- HL - filter górnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy, dolnoprzepustowy dla kolumn,
- HH - filter górnoprzepustowy zaaplikowany do wierszy i kolumn.

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[47].

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 częstotliwości-



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[19, 30, 24] lub wysokich pasmach częstotliwości[47, 29].

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[33]. 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[7]. 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”[46], oraz praca „Edge-based image steganography” oparta na wykrywaniu krawędzi obrazu[20].

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. Dorigo, V. Maniezzo i A. Coloni[14]. Jej autorzy przedstawili ideę oraz zastosowania algorytmu wzorującego się na zachowaniu mrówek poszukujących pożywienia. 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 odnalezienia pożywienia. Początkowo, każda mrówka porusza się w chaotyczny i losowy sposób przeszukując 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 wybierana przez mrówki jednocześnie stają się dla nich bardziej atrakcyjne.

Istotnym aspektem w zjawisku odkładania śladu feromonowego jest jego wyparowywanie pod wpływem czasu. Jest to kluczowa właściwość, przyczyniająca się do zbieżności tras obieranych przez mrówki do optymalnej (najkrótszej) drogi prowadzącej do pożywienia. Taki stan 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[14]:

- 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[2].

- 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 dzielenie 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 osiągnięcie 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 pozwala 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 kolei 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[15, 2].

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[15, 32].

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 odwiedzane 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. Mengerę w roku 1930[26]. 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 $O(n^3)$ [9]. 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[3]. Do najszerzej stosowanych należą symulowane wyżarzanie (ang. *Simulated Annealing*)[23], algorytmy genetyczne (ang. *Genetic Algorithms*)[16], metody optymalizacji cząsteczkowej (ang. *Particle swarm optimization*)[35] oraz opisywane w tym rozdziale systemy mrówkowe o mrowiskowe. Wszystkie z wymienionych metod były wykorzystywane w rozwiązywaniu problemu komiwojażera[38, 26].

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[14]. 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*)[25, 17],
- harmonogramowanie (ang. *scheduling*)[10, 27],
- marszrutyzacja (ang. *vehicle routing problem*)[6],

- trasowanie w sieciach (ang. *routing*)[8, 4].

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[14].

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- do momentu odwiedzenia wszystkich 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. Dorigo, V. Maniezzo i A. Coloni, 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.

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

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.

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

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.

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

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 wierzchołki 2.4. Powoduje to dodatkowe faworyzowanie widoczności przy wyborze krawędzi, gdyż krótsze krawędzie będą stawać się bardziej atrakcyjne dla innych mrówek.

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

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 .

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

Twórcy powyższych algorytmów z powodzeniem przeprowadzili eksperymenty, których celem było zbadanie ich efektywności w rozwiązywaniu problemu komiwożera. W przypadku każdego z modeli osiągnięto zadowalające wyniki, lecz najszybszą zbieżność do optymalnych rozwiązań zaobserwowano w modelu z feromonem cyklicznym. Podczas eksperymentów, autorzy uzyskali ówczesnie 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 komiwożera 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 osiągnano najlepsze rezultaty gdy ilość mrówek m jest zbliżona do ilości wierzchołków n grafu reprezentującego problem. Dla wariantu algorytmu z feromonem cyklicznym, najlepsze rezultaty osiągnano dla współczynnika odparowania $(1-\rho)$ bliskiemu 0.5, i wartości α i β będących w stosunku $\frac{\beta}{\alpha}$ zbliżonym do zakresu $[2.5, 5]$ [14].

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[11]. 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 odprowadzania 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 reguła 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*[44], 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 .

$$s = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{u \in J} \{\tau_{ij} \eta_{ij}^\beta\} & q \leq q_0 \\ \frac{\tau_{ij} \eta_{ij}^\beta}{\sum_{j \in J} \tau_{ij} \eta_{ij}^\beta} & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases} \quad (2.6)$$

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

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

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

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

Autorom udało się dowieść, że zaproponowany system mrówkowy 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 mrówkowego 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*)[42]. Podobnie jak w przypadku pracy *Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman*

problem[11], głównym celem autorów było zaproponowanie wariantu algorytmu mrówkowego który gwarantuje lepsze wyniki dla problemów większych rozmiarów.

Autorzy zaproponowali następujące usprawnienia względem systemu mrówkowego zaproponowanego przez M. Dorigo 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 działania 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*)[12] oraz systemy rankingowe (ang. *Rank Ant System - ASRank*)[5]. Jak można ocenić, dziedzina systemów mrówkowych jest wciąż aktualna w rozwiązywaniu problemów, których rozwiązania są nieosiągalne przy stosowaniu algorytmów wyczerpujących i zachłannych[13].

Bibliografia

- [1] American Psychological Association. Perception of high and low spatial frequency information in pigeons and people, 2015.
- [2] P. Balaji, D. Srinivasan. An introduction to multi-agent systems. 2010.
- [3] L. Bianchi, M. Dorigo, L. Gambardella, W. Gutjahr. A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. *Natural Computing*, 8:239–287, 2008.
- [4] E. Bonabeau, F. Hénaux, S. Guerin, D. Snyers, P. Kuntz, G. Theraulaz. Routing in telecommunications networks with smart ant-like agents. 1998.
- [5] B. Bullnheimer, R. Hartl, C. Strauss. A new rank based version of the ant system: A computational study. 1997.
- [6] B. Bullnheimer, R. Hartl, C. Strauss. Applying the ant system to the vehicle routing problem. 1999.
- [7] K. Cabeen, P. Gent. image compression and the discrete cosine transform. College of Redwoods.
- [8] G. D. Caro. Antnet: A mobile agents approach to adaptive routing. 1999.
- [9] Nicos Christofides. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. 1976.
- [10] Alberto Coloni, Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo, Marco Trubian. Ant system for job-shop scheduling. *STATISTICS AND COMPUTER SCIENCE*, 34, 01 1994.

- [11] M. Dorigo, L. Gambardella. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 1:53–66, 1997.
- [12] 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.
- [13] M. Dorigo, T. Stützle. The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications, and advances. 2003.
- [14] Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo, Alberto Colorni. Ant system: An autocatalytic optimizing process technical report 91-016. 02 1999.
- [15] A. Dorri, Salil S. Kanhere, Raja Jurdak. Multi-agent systems: A survey. *IEEE Access*, 6:28573–28593, 2018.
- [16] A. Fraser. Simulation of genetic systems by automatic digital computers i. introduction. *Australian Journal of Biological Sciences*, 10:484–491, 1957.
- [17] L. Gambardella, É. Taillard, M. Dorigo. Ant colonies for the quadratic assignment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 50:167–176, 1999.
- [18] 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.
- [19] J. Huang, Y. Shi. Embedding image watermarks in dc components. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 10:974–979, 2000.
- [20] S. Islam, Mangat Rai Modi, P. Gupta. Edge-based image steganography. *EURASIP Journal on Information Security*, 2014:1–14, 2014.
- [21] 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.

- [22] Sahib Khan, M. Yousaf, Jamal Akram. Implementation of variable least significant bits steganography using dddb algorithm. 2011.
- [23] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671 – 680, 1983.
- [24] X. Li, J. Wang. A steganographic method based upon jpeg and particle swarm optimization algorithm. *Inf. Sci.*, 177:3099–3109, 2007.
- [25] V. Maniezzo, A. Colorni. The ant system applied to the quadratic assignment problem. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 11:769–778, 1999.
- [26] A. Mazidi, Elham Damghanijazi. Meta-heuristic approaches for solving travelling salesman problem. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8:18–23, 2017.
- [27] D. Merkle, M. Middendorf, H. Schmeck. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 6:333–346, 2002.
- [28] Scott Mitchell. H.264 encoded digital video protection using temporal redundancy lsb steganography. 2018.
- [29] 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.
- [30] Sunil Muttoo, Sushil Kumar. Data hiding in jpeg images. *International Journal of Information Technology (IJIT)*, 1, 07 2009.
- [31] Hebah H. O. Nasereddin. Digital watermarking a technology overview. 2011.
- [32] M. Oprea. Applications of multi-agent systems. *IFIP Congress Tutorials*, 2004.
- [33] Sabrina Perfetto, John D. Wilder, Dirk B. Walther. Effects of spatial frequency filtering choices on the perception of filtered images. *Vision*, 4, 2020.
- [34] F. Petitcolas, R. Anderson, M. Kuhn. Information hiding-a survey. 1999.

-
- [35] R. Poli, J. Kennedy, T. Blackwell. Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, 1:33–57, 2007.
 - [36] M. Pope, M. Warkentin, E. Bekkering, M. B. Schmidt. Digital steganography - an introduction to techniques and tools. *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, 30:22, 2012.
 - [37] Roshan Poudél. *Covert Channel and Data Hiding in TCP/IP*. 11 2019.
 - [38] 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.
 - [39] 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.
 - [40] 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.
 - [41] N. Sharma, Usha Batra. An inclusive study and analysis of steganographic methodologies for data security. 2020.
 - [42] T. Stützle, H. Hoos. Max-min ant system. *Future Gener. Comput. Syst.*, 16:889–914, 2000.
 - [43] 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.
 - [44] Chris Watkins. Learning from delayed rewards. 1989.
 - [45] David Wheeler, Daryl Johnson, Bo Yuan, P. Lutz. Audio steganography using high frequency noise introduction. 2012.

-
- [46] Da-Chun Wu, W. Tsai. A steganographic method for images by pixel-value differencing. *Pattern Recognit. Lett.*, 24:1613–1626, 2003.
 - [47] 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.
 - [48] Zhiqiang Zhu, N. Zheng, Tong Qiao, Ming Xu. Robust steganography by modifying sign of dct coefficients. *IEEE Access*, 7:168613–168628, 2019.

Spis rysunków

- 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/> 8

Spis tablic