

Spis treści

1. Wstęp	5
2. Podobieństwa do innych języków programowania	7
2.1. Podstawowe cechy	7
2.2. Typy generyczne	7
2.3. Typy wartościowe i referencyjne	9
2.4. Domknięcia jako typy pierwszoklasowe	11
2.5. Leniwość	12
2.6. Elementy zaczerpnięte z języków funkcyjnych	13
2.7. Zwięzłość składni	14
2.8. Rozszerzenia typów	15
3. Podobieństwa i różnice pomiędzy Swiftem i Objective-C	17
3.1. Podobieństwa	17
3.1.1. Swift i Objective-C jako języki programowania obiektowego .	17
3.1.2. Zarządzanie pamięcią	19
3.1.3. Biblioteki	20
3.2. Różnice	21
3.2.1. Składnia	21
3.2.2. System typów	21
3.2.3. Wywołania metod	22
3.2.4. Bezpieczeństwo	25
4. Testy	27

4.1. Metodologia badań	27
4.2. Założenia i platforma testowa	28
4.3. Wstawianie elementu do tablicy	29
4.3.1. Omówienie	29
4.3.2. Analiza działania	29
4.3.3. Podsumowanie	32
4.4. Rekurencyjne obliczanie liczby Fibonacciego	32
4.4.1. Omówienie	32
4.4.2. Analiza działania	32
4.5. Sortowanie bąbelkowe	34
4.5.1. Omówienie	34
4.5.2. Analiza działania	34
4.5.3. Podsumowanie	37
4.6. Budowanie binarnego drzewa poszukiwań	38
4.6.1. Omówienie	38
4.6.2. Analiza działania	39
4.6.3. Podsumowanie	42
4.7. Rodzaje wywołania metod	42
4.7.1. Omówienie	42
4.7.2. Analiza działania	43
4.7.3. Podsumowanie	44
4.8. Złożony algorytm	46
4.8.1. Omówienie	46
4.8.2. Analiza działania	47
4.8.3. Podsumowanie	50
4.9. Pozostałe testy	51
4.9.1. Zliczanie słów	51
4.9.2. Sito Eratostenesa	51
4.9.3. Zliczanie liter, słów i linii	51
4.9.4. Konkatenacja napisów	51

<i>SPIS TREŚCI</i>	3
4.9.5. Histogram RGB	51
4.9.6. Szyfr RC4	52
4.9.7. Wyniki pozostałych testów	52
5. Wnioski	55
5.1. Podsumowanie wyników	55
5.2. Słabe i mocne strony Swifta na podstawie testów	56
5.3. Perspektywy na przyszłość	56
6. Podsumowanie i dalsze kierunki	59
Bibliografia	61

Rozdział 1.

Wstęp

Swift to język programowania stworzony przez firmę Apple na potrzeby tworzenia aplikacji na platformy iOS, Mac OS, tvOS i WatchOS. Jego pierwsza wersja została zapowiedziana 2 czerwca 2014 roku podczas konferencji Apple Worldwide Developers Conference (WWDC) i wydana 9 września 2014 roku.

Przed 2014 rokiem głównym językiem używanym do tworzenia oprogramowania na systemy operacyjne Apple był język Objective-C. Powstał on w 1983 roku jako nakładka na język C rozszerzająca go o elementy obiektowe wzorowane na Smalltalku. Głównym problemem Objective-C jest wysoki poziom trudności. Składnia tego języka różni się znacznie od składni innych popularnych języków obiektowych, jest dużo bardziej skomplikowana i mniej czytelna. Również wydajność nie jest najlepsza. W celu uzyskania szybko działającego kodu programiści często wykorzystują fakt, że Objective-C współpracuje z językiem C i używają go do zaimplementowania najważniejszych części aplikacji.

Swift ma za zadanie rozwiązać problemy, z którymi zmagają się Objective-C. Jego składnia jest dużo prostsza i bardziej podobna do innych obiektowych języków programowania. Zaadresowano również zwiększenie wydajności i bezpieczeństwa kodu. Swift otrzymał nowe funkcje pozwalające pisać kod szybciej, wydajniej i bezpieczniej. Dokładne porównanie obydwu języków znajduje się w rozdziale 3.

Swift zaczął bardzo szybko zyskiwać na popularności. Według ankiety przeprowadzanej co roku przez serwis **StackOverflow.com** już w 2017 roku nowy język był bardziej popularny od swojego poprzednika ¹. Należy również zwrócić uwagę na kategorię "Most Loved Languages", w której Swift rokrocznie zajmuje miejsce w pierwszej szóstce.

3 grudnia 2015 roku kod źródłowy języka został udostępniony w serwisie GitHub. W tym samym momencie ogłoszono również wsparcie dla systemów z rodziny Linux. Te dwa wydarzenia pozwoliły na próby zastosowania tego języka w innych

¹<https://insights.stackoverflow.com/survey/2017#most-popular-technologies>

gałęziach IT innych niż aplikacje mobilne. W niedługim czasie powstało kilka ram do tworzenia aplikacji serwerowych, takich jak Kitura, Vapor czy Perfect. Firma IBM dodała również wsparcie dla Swifta w swoich serwisach chmurowych. Kolejnym potencjalnym zastosowaniem jest uczenie maszynowe. Pierwszą próbą w tym kierunku jest wersja platformy TensorFlow wykorzystująca Swift (Swift for TensorFlow).

Pomimo szybko rosnącej popularności Swifta, istnieje mało źródeł traktujących o wydajności nowego języka. W Internecie można znaleźć kilka stron i blogów zawierających testy wydajnościowe, takich jak np. "The Computer Language Benchmark Game"² czy blog firmy Yalantis³, żaden z autorów nie pokusił się jednak o bardziej wnikliwą analizę.

Z tego też powodu, głównym celem niniejszej pracy jest porównanie wydajności programów napisanych w Swift z Objective-C oraz analiza przyczyn lepszej (lub gorszej) wydajności nowego języka. Aby to osiągnąć, zaimplementowano w obydwu językach szereg testów wydajnościowych. Następnie za pomocą narzędzia profilującego Instruments dokonano analizy szybkości działania kodu w zależności od języka, w którym został napisany. Szczegółowe wnioski znajdują się w rozdziale 4., natomiast podsumowanie zostało przedstawione w rozdziale 5.

²<https://benchmarksgame-team.pages.debian.net/benchmarksgame/faster/swift.html>

³<https://yalantis.com/blog/is-swift-faster-than-objective-c>

Rozdział 2.

Podobieństwa do innych języków programowania

2.1. Podstawowe cechy

Swift to wieloparadygmataowy język programowania łączący pomysły znane z innych popularnych języków, takich jak: Objective-C, C#, Rust, Haskell czy Ruby. Podobnie jak C#, pozwala na tworzenie struktur (typów wartościowych), klas (typów referencyjnych) i typów wyliczeniowych. Wspiera również dziedziczenie (ale nie wielokrotne), definiowanie protokołów (odpowiednik interfejsów z C# czy Java) oraz polimorfizm parametryczny (typy generyczne), nie pozwala natomiast na definiowanie klas abstrakcyjnych, zachęcając tym samym programistów do szerokiego stosowania interfejsów.

2.2. Typy generyczne

Swift wspiera dwie podstawowe koncepcje generyczności:

- klasy, struktury, typy wyliczeniowe oraz funkcje z parametrami typu (ang. *generics*)
- protokoły z typami powiązanymi (ang. *associated types*)

Klasy (struktury, funkcje) ze zmiennymi typu to pomysł dobrze znany z większości popularnych języków programowania obiektowego, takich jak C# czy Java. W momencie definiowania klasy programista ma możliwość zdefiniowania zmiennych przebiegających przestrzeń typów używanych w definiowanej klasie. Dodatkowo, Swift oferuje kilka bardziej zaawansowanych mechanizmów związanych ze zmiennymi typu:

- możliwość dodania ograniczeń na typy, po których przebiega zmienna, np. pod zmienną można podstawić tylko typ implementujący dany protokół lub dziedziczącym po danej klasie
- automatyczna inferencja typów parametrów generycznych
- możliwość nadawania aliasów funkcjom i typom generycznym

Przykład użycia typów generycznych ilustruje Listing 1.

```
class Stack<T> {
    var stack: Array<T> = []
    func push(object: T) {
        stack.append(object)
    }
    func pop() -> T {
        return stack.removeLast()
    }
}

class PopManyStack<T> : Stack<T> {
    func popN(n: Int) -> [T] {
        let lastN = stack.suffix(n)
        stack.removeLast(n)
        return Array(lastN)
    }
}
```

Listing 1: Przykład klasy generycznej i klasy pochodnej w Swift

W odróżnieniu od klas, struktur i funkcji, protokoły nie wspierają generycznych parametrów typu. Zamiast tego, protokoły posiadają mechanizm typów powiązanych (ang. *associated types*), wzorowany na znanym np. ze Scali mechanizmie abstrakcyjnych pól typu (ang. *abstract type members*). Pozwala on na zdefiniowanie w protokole zmiennej typu, która zostanie ukonkretniona dopiero przez klasę implementującą dany protokół. Główną zaletą tego rozwiązania jest ukrycie typu podstawionego pod zmienną przed programistą używającym klasy implementującej dany protokół - typ podstawiany pod zmienną jest częścią implementacji i nie musi być jawnie podawany podczas tworzenia obiektu implementującego protokół. Przykład użycia protokołu z parametrami typu prezentuje Listing 2.

```
import UIKit

protocol ViewDecorator {
    associatedtype ViewType: UIView // typ powiązany
    func decorate(view: ViewType)
}
```



```

class ImageViewDecorator: ViewDecorator {
    typealias ViewType = UIImageView

    func decorate(view: UIImageView) {
        view.backgroundColor = UIColor.black
        view.layer.cornerRadius = 5.0
        // ... więcej ustawień
    }
}

class LabelDecorator: ViewDecorator {
    typealias ViewType = UILabel

    func decorate(view: UILabel) {
        view.font = UIFont.systemFont(ofSize: 20.0)
        // ...
    }
}

let decorator1 = ImageViewDecorator() // nie trzeba podawać typu generycznego,
                                     // implementacja klasy wskazuje, czym jest ViewType
let decorator2 = LabelDecorator()
decorator1.decorate(view: UIImageView()) // system typów pilnuje,
                                     // aby view było typu UIImageView
decorator2.decorate(view: UILabel())

```

Listing 2: Przykład protokołu z typem powiązany w Swift

2.3. Typy wartościowe i referencyjne

Podobnie jak w języku C#, typy w Swiftcie można podzielić na dwie grupy:

- typy wartościowe (ang. *value types*)
- typy referencyjne (ang. *reference types*)

Typy wartościowe to typy, które tworzą nowe instancje obiektów podczas przypisywania do zmiennej lub przekazywania do funkcji. Innymi słowy, każda instancja posiada swoją własną kopię danych, obiekty takie nie dzielą ze sobą stanu, przez co są łatwiejsze w zrozumieniu i bezpieczniejsze dla aplikacji używających wielu wątków. Jeśli zmienna typu wartościowego zostanie zadeklarowana jako stała, cały obiekt, łącznie ze wszystkimi polami nie może zostać zmieniony. Typami wartościowymi w Swiftcie są:

- struktury

- typy wyliczeniowe
- krotki

Typy referencyjne to typy, których obiekty dzielą pomiędzy sobą te same dane, a podczas przypisywania lub przekazywania do funkcji tworzona jest tylko nowa referencja do tego samego adresu w pamięci. Zmienne typu referencyjnego zadeklarowane jako stałe zapewniają jedynie stałość referencji, jednak dane przypisane do zmiennej mogą być bez dowolnie zmieniane. Typami referencyjnymi w Swiftcie są klasy oraz domknięcia.

W odróżnieniu od innych języków, struktury oraz klasy w Swift mają bardzo podobną funkcjonalność. Obie konstrukcje językowe pozwalają na:

- definiowanie właściwości
- definiowanie metod (statycznych oraz instancji)
- definiowanie inicjalizatorów
- implementowanie protokołów
- tworzenie rozszerzeń typu

Głównymi różnicami (poza wspomnianymi już w tej sekcji różnicami pomiędzy typami wartościowymi i referencyjnym) są natomiast:

- możliwość dziedziczenia dla klas
- możliwość definiowania własnych deinicjalizatorów dla klas
- automatycznie wygenerowany inicjalizator dla struktur

Co ciekawe, wszystkie podstawowe typy zdefiniowane w bibliotece standardowej: typ boolowski `Bool`, typy całkowitoliczbowe bezznakowe `UInt8/16/32/64` oraz znakowe `Int8/16/32/64`, zmiennoprzecinkowe `Float` oraz `Double`, typ znakowy `Character`, typ napisowy `String`, tablica `Array` oraz słownik `Dictionary` zostały zaimplementowane jako struktury.

```
// struktura - typ wartościowy
struct UserInfo {
    let name: String
    let identifier: Int
}

// typ wyliczeniowy
enum ScreenResolution {
    case SD
```

```

    case HD
    case FullHD
}
// protokół - obiekt definiujący interfejs klasy/struktury go implementującej
protocol UserInfoDrawer {
    func drawUserInfo(info: UserInfo) -> Void
}
// klasa - typ referencyjny
class TerminalUserInfoDrawer: UserInfoDrawer {
    var screenResolution: ScreenResolution = .FullHD

    func drawUserInfo(info: UserInfo) -> Void {
        // .. implementacja wyświetlania informacji o użytkowniku
    }
}

```

Listing 3: Przykładowe definicje podstawowych obiektów w Swift: struktury, klasy, protokołu i typu wyliczeniowego

2.4. Domknięcia jako typy pierwszoklasowe

Podobnie jak w językach funkcyjnych i w większości nowoczesnych języków programowania obiektowego, domknięcia w Swifcie są typem pierwszoklasowym (ang. *first-class citizen*), tzn:

- mogą być przechowywane w zmiennych i stanowić elementy struktur danych
- mogą być podawane jako parametry wywołania funkcji i metod
- mogą być zwracane przez funkcje i metody

```

let sum = { (x: Int) in
    return { (y: Int) in
        return x + y
    }
}

let sum5 = sum(5)
let _5sum4 = sum5(4)

```

Listing 4: Przykład użycia domknięcia w Swift

2.5. Leniwość

Swift domyślnie używa gorliwej ewaluacji wyrażeń, autorzy zaimplementowali jednak dwa rozwiązania pozwalające w podstawowym stopniu na wspieranie leniwych obliczeń. Po pierwsze, w Swiftcie, podobnie jak w C#, istnieje możliwość leniwej inicjalizacji obiektów. O ile jednak w C# mechanizm ten polega na użyciu klasy *Lazy* z biblioteki standardowej, o tyle w Swiftcie jest on zaszyty w samym języku - służy do tego słowo kluczowe *lazy*. Obiekt utworzony przy użyciu tego słowa zostanie stworzony dopiero w chwili pierwszego odwołania się do niego. Drugim rozwiązaniem są leniwe struktury danych, których implementacja opiera się na znanych również z języka C# czy Java generatorach.

```
typealias BigInt = Int

class DataContainer {
    // zmienna tworzona leniwie, dopiero podczas jej pierwszego użycia
    lazy var bigData = BigInt()

    // .. reszta ciała klasy
}

let container = DataContainer()
print(container.bigData) // obiekt bigData zostanie utworzony dopiero w tym momencie

// sekwencja liczb Fibbonacciego generowana leniwie
class Fibonacci: LazySequenceProtocol {
    public func makeIterator() -> FibonacciIterator {
        return FibonacciIterator()
    }
}

// generator liczb Fibbonacciego
class FibonacciIterator: IteratorProtocol {
    private var first = 0
    private var second = 1

    public func next() -> Int? {
        let next = first + second
        first = second
        second = next
        return next
    }
}

let evenFibonacci = Fibonacci().filter { $0 % 2 == 0 }
var iterator = evenFibonacci.makeIterator()

for i in 1...5 {
    print(iterator.next()!)
}
```

Listing 5: Przykład deklaracji leniwej zmiennej i leniwej sekwencji w Swift

2.6. Elementy zaczerpnięte z języków funkcyjnych

Pomimo faktu, że Swift był projektowany głównie jako język programowania obiektowego, jego twórcy skupili dużą część swojej uwagi na elementach powiązanych z programowaniem funkcyjnym, które mogłyby pomóc programistom pisać bezpieczniejszy i bardziej czytelny kod obiektowy. Najważniejsze z nich to:

- Typy wyliczeniowe z wartościami powiązanymi (ang. *associated values*), które pozwalają na definiowanie typów podobnych do algebraicznych typów danych (ang. *Algebraic data types*) znanych z programowania funkcyjnego.

```
indirect enum Tree<Value> {
    case Empty
    case Node(Tree<Value>, Value, Tree<Value>)
}

let intTree = Tree.Node(
    .Node(.Empty, 1, .Empty),
    2,
    .Empty
)
```

Listing 6: Implementacja drzewa binarnego w Swift za pomocą typu wyliczeniowego

- Dzięki zwięzłej i eleganckiej składni oraz potraktowaniu domknięć na równi klasami i strukturami, Swift oferuje bardzo dobre wsparcie dla funkcji wyższego rzędu. Funkcje wyższego rzędu są też często używane w bibliotece standardowej, np. kolekcje danych posiadają najczęściej używane funkcje służące do manipulowania nimi, takie jak `filter`, `map`, `reduce` czy `flatMap`.
- Autorzy Swifta postawili bardzo duży nacisk na niemutowalne struktury danych, co przejawia się w całej składni języka. Dostępne jest słowo odrębne słowo kluczowe `let` służące do deklarowania stałych, parametry przekazywane do funkcji są domyślnie stałymi, a użycie typów wartościowych jest preferowane nad użyciem klas (również w bibliotece standardowej).
- Swift posiada zaawansowany mechanizm *pattern matching*, który można wykorzystać do przetwarzania typów wyliczeniowych, krotek i wyrażeń. Tak jak w wielu językach funkcyjnych, *pattern matching* w Swiftcie jest wyczerpujący (ang. *exhaustive*), co oznacza, że każda wartość, która może pojawić się podczas dopasowywania musi zostać obsłużona.

- Aby uniknąć problemów z wartością `nil`, w języku Swift każda zmienna musi zostać zainicjalizowana już w momencie deklaracji. Jeśli programista chce celowo stworzyć zmienną mogącą przyjmować wartość `nil`, powinien użyć typu `Optional<T>`, który w swojej konstrukcji jest bardzo podobny do monady `Maybe` znanej z Haskellu. Istnieje nawet mechanizm zwany *optional chaining*, który zachowuje się tak, jak operacja `>>=` dla monady `Maybe`.

```
// Implementacja typu Optional z biblioteki standardowej
public enum Optional<Wrapped> {
    case none
    case some(Wrapped)
}

// Monada Maybe w Haskellu
// data Maybe a = Nothing | Just a

struct Address {
    let city: String? // String? to cukier syntaktyczny dla typu Optional<String>
    let postalCode: String?
}

struct User {
    let name: String
    let address: Address?
}

let sampleUser: User? = User(
    name: "Jan Kowalski",
    address: Address(city: "Wrocław", postalCode: "50-500")
)

// Przykład użycia optional chaining - stała city ma typ Optional<String>
let city = sampleUser?.address?.city
```

Listing 7: Typ `Optional` i mechanizm *optional chaining*

2.7. Zwięzłość składni

Jednym z największych problemów podczas programowania w Objective-C była słaba czytelność kodu i bardzo rozwlekła składnia. Dlatego podczas projektowania Swifta inżynierowie Apple mocno wzorowali się na językach znanych ze swojej zwięzłości i łatwości czytania, takich jak Python czy Ruby. Zrezygnowano z plików nagłówkowych, dodano dużą ilość dodatkowej składni upraszczającej kod (tzw. *cukru syntaktycznego*) dla najczęściej stosowanych konstrukcji (jak np. operator `T?` dla typu `Optional<T>`), wprowadzono domyślną inferencję typów. Rysunek 8 pokazuje różnice pomiędzy kodem napisanym w Objective-C, a równoważnym kodem w Swift.

```
// Objective-C
if (myDelegate != nil) {
    if ([myDelegate respondsToSelector:
        @selector(scrollViewDidScroll:)]) {
        [myDelegate scrollViewDidScroll:myScrollView];
    }
}

// Swift
myDelegate?.scrollViewDidScroll?(myScrollView)
```

Listing 8: Przykładowy kod ilustrujący różnice w zwięzłości i czytelności Objective-C (na górze) i Swift (na dole). *WWDC Keynote 2014*

2.8. Rozszerzenia typów

Jedną z rzadziej spotykanych w statycznie typowanych językach programowania funkcjonalności jest możliwość rozszerzania istniejących już typów. Co prawda już w Objective-C programista miał możliwość stworzenia kategorii (ang. *category*), ale pozwalała ona tylko na dodawanie nowych funkcji, nie można było natomiast definiować nowych właściwości, konstruktorów ani typów zagnieżdżonych. Dlatego w Swiftie zostały zaimplementowane rozszerzenia (ang. *extensions*), które pozwalają na:

- dodawanie nowych właściwości obliczanych (ang. *computed properties*)
- definiowanie nowych metod instancji i metod typu
- definiowanie nowych inicjalizatorów
- definiowanie i używanie typów zagnieżdżonych
- implementowanie metod protokołów

```
// Rozszerzenie dla typu String z biblioteki standardowej
extension String {
    func isEmpty() -> Bool {
        return self != ""
    }
}
```

Listing 9: Przykład rozszerzenia w Swift

Rozdział 3.

Podobieństwa i różnice pomiędzy Swiftem i Objective-C

3.1. Podobieństwa

3.1.1. Swift i Objective-C jako języki programowania obiektowego

Zarówno Swift, jak i Objective-C są głównie językami programowania obiektowego. Oba języki pozwalają na definiowanie własnych typów (klasy i typy wyliczeniowe w Objective-C, struktury, klasy oraz typy wyliczeniowe w Swiftcie), wspierają dziedziczenie i protokoły. Dzięki modyfikatorom dostępu oraz protokołom umożliwiają również enkapsulację implementacji i opisywanie zachowań za pomocą abstrakcyjnych typów danych.

```
#import <Foundation/Foundation.h>

// Definicja typu Book
@interface Book: NSObject
@property (copy, nonatomic, readonly) NSString *title;
@property (copy, nonatomic, readonly) NSString *author;
@property (copy, nonatomic, readonly) NSNumber *numPages;
- (instancetype)initWithTitle:(NSString *)title author:(NSString *)author
  numPages:(NSNumber *)numPages;
@end

@implementation Book
- (instancetype)initWithTitle:(NSString *)title author:(NSString *)author
  numPages:(NSNumber *)numPages {
    if (self = [super init]) {
        _title = title;
        _author = author;
        _numPages = numPages;
    }
    return self;
}
```

```

}
@end

// Definicja interfejsu BookPrinter
@protocol BookPrinter
- (void)printBook:(Book *)user;
@end

// Definicja klasy ConsoleBookPrinter implementującego protokół BookPrinter
@interface ConsoleBookPrinter: NSObject <BookPrinter>
@end

@implementation ConsoleBookPrinter
- (void)printBook:(Book *)book {
    NSLog(@"-----");
    NSLog(@"> Tytuł: %@", book.title);
    NSLog(@"> Autor: %@", book.author);
    NSLog(@"> Ilość stron: %@", book.numPages);
    NSLog(@"-----");
}
@end

int main (int argc, const char * argv[])
{
    Book* book = [[Book alloc] initWithTitle: @"Sztuka programowania"
                                           author: @"Donald Knuth"
                                           numPages: @(2338)];

    id<BookPrinter> printer = [ConsoleBookPrinter new];
    [printer printBook: book];
    return 0;
}

```

Listing 10: Przykład kodu obiektowego w Objective-C

```

struct Book {
    let title: String
    let author: String
    let numPages: Int
}

protocol BookPrinter {
    func printBook(_ book: Book)
}

class ConsoleBookPrinter: BookPrinter {
    func printBook(_ book: Book) {
        print("-----");
        print("> Tytuł: \(book.title)");
        print("> Autor: \(book.author)");
        print("> Ilość stron: \(book.numPages)");
        print("-----");
    }
}

```

```

    }
}

let book = Book(title: "Sztuka programowania", author: "Donald Knuth", numPages: 2338)
let printer: BookPrinter = ConsoleBookPrinter()
printer.printBook(book)

```

Listing 11: Analogiczny kod napisany w Swifcie

3.1.2. Zarządzanie pamięcią

W początkowych wersjach systemu Mac OS i iOS zarządzanie pamięcią było w pełni manualne - co prawda obiekty (a właściwie wskaźniki do nich) posiadały liczniki referencji, jednak programista musiał sam zadbać o zarządzanie nimi. Przełom nastąpił w roku 2011, kiedy to do Objective-C zostało dodane automatyczne zliczanie referencji (ang. *automatic reference counting*, w skrócie: ARC).

Automatyczne zliczanie referencji to jedna z najprostszych metod zarządzania pamięcią, odciążająca programistę z obowiązku jawnego inkrementowania i dekrementowania liczników referencji. Użycie ARC w Objective-C powoduje wygenerowanie kodu, który zwiększa licznik referencji w momencie, gdy nowa referencja do obiektu zostaje utworzona (np. inicjalizacja, przypisanie, przekazania obiektu w parametrze) oraz zmniejsza go, w momencie usunięcia referencji. Dzięki temu programista nie musi manualnie używać funkcji `retain` i `release`, jak to miało miejsce wcześniej. Pozwala to na zapobiegnięcie wielu błędom, takim jak: wycieki pamięci, wielokrotne zwalnianie pamięci czy odwoływanie się do wcześniej zwolnionej pamięci. Jednocześnie, użycie ARC nie wprowadza niedeterminizmu, co ma miejsce w przypadku użycia automatycznego odśmiecania pamięci (ang. *garbage collector*) oraz ma znikomy wpływ na wydajność działania aplikacji.

ARC jest również metodą zarządzania pamięcią zaimplementowaną w Swifcie. Główną różnicą jest jednak sposób implementacji. W Objective-C, ARC jest rozszerzeniem języka, opierającym się głównie na generowaniu kodu odpowiedzialnego za zliczanie referencji. W Swifcie natomiast, ARC jest właściwością języka, posiadającą odrębną składnię i wsparcie ze strony środowiska uruchomieniowego i kompilatora.

```

class Property {
    let address: String
    let price: Int

    init(address: String, price: Int) {
        self.address = address
        self.price = price
    }
}

```

```

}

class Owner {
    let name: String
    var ownedProperty: Property?

    init(name: String) {
        self.name = name
    }
}

func test() {
    var property: Property? = Property(address: "Rynek 1", price: 1000000)
    var owner: Owner? = Owner(name: "Jan Kowalski")
    owner?.ownedProperty = property
    property = nil
    print(owner!.ownedProperty!.address)
}

```

Listing 12: Przykład kodu wykorzystującego ARC w Swift

Listing 12 przedstawia fragment kodu używający ARC. W przykładzie tym zaimplementowane zostały dwie klasy: `Property` oraz `Owner`. W pierwszej linii funkcji `test` tworzony jest obiekt typu `Property`, referencja do niego jest przypisywana do zmiennej `property`, a jego licznik referencji jest równy 1. Analogicznie, w drugiej linii tworzony jest obiekt typu `Owner`. Następnie do właściwości `ownedProperty` obiektu `owner`, zostaje przypisana referencja do obiektu spod zmiennej `property`, co skutkuje zinkrementowaniem jego licznika do 2. W linii 4. początkowa referencja `property` zostaje usunięta, przez co licznik referencji tego obiektu zostaje zdekrementowany do 1, nadal jednak można się do niego odwołać poprzez właściwość obiektu `owner` (linia 5.). Gdy funkcja kończy działanie, wszystkie liczniki referencji obiektów przypisanych do zmiennych lokalnych zostają zdekrementowane i, jeśli wartość liczników wynosi 0, obiekty te zostają usunięte. Zatem obiekt `Owner(name: "Jan Kowalski")` zostanie zdealokowany. Podczas dealokowania zostanie wywołana dla tego obiektu funkcja `deinit`, która domyślnie dekrementuje liczniki referencji wszystkich obiektów przypisanych do właściwości danego obiektu. W tym wypadku, zmniejszony zostanie licznik obiektu pod właściwością `ownedProperty`, czyli `Property(address: "Rynek 1")`. Po tej operacji jego wartość wyniesie 0, co poskutkuje zdealokowaniem zajmowanej przez niego pamięci.

3.1.3. Biblioteki

Jedną z cech, dla której Swift tak szybko zdobywa popularność jest możliwość wywoływania kodu Objective-C z poziomu kodu swiftowego i na odwrót (ang. *interoperability*). Z tego względu prawie wszystkie biblioteki standardowe posiadają bardzo podobne interfejsy i są dostępne w obu językach. Oba języki posiadają też

możliwość wywoływania kodu pisanego w języku C, dlatego też wiele z zaawansowanych, niskopoziomowych bibliotek było dostępnych dla Swifta już od dnia jego prezentacji.

3.2. Różnice

3.2.1. Składnia

Objective-C to język, którego początki sięgają pierwszej połowy lat 80. Z tego powodu, niektóre jego cechy są w tym momencie uważane w środowisku developerów, za przestarzałe i niewygodne. Mając te cechy na uwadze, inżynierowie Apple opracowali nowy język z uproszczoną składnią i wieloma udogodnieniami pozwalającymi programistom w krótszym czasie pisać kod, który będzie czytelniejszy i łatwiejszy w utrzymaniu.

Pierwszym z udogodnień zaimplementowanych Swifta jest inferencja typów. W Objective-C każdy typ zmiennej musiał zostać jawnie napisany, co szczególnie w przypadku długich, złożonych typów (np. zawierających parametry generyczne) mogło być mocno uciążliwe. Kompilator Swifta natomiast stara się wywnioskować tak wiele informacji o typach, ile jest w stanie.

Po drugie, sama składnia języka jest dużo bardziej zwięzła i czytelna. W Swiftcie usunięto konieczność pisania nawiasów przy warunkach instrukcji warunkowych i pętli, dodano możliwość oddzielania kolejnych instrukcji poprzez znak nowej linii (nie ma potrzeby pisania znaku średnika na końcu linii), zaimplementowano dużo prostszą obsługę ciągów znakowych, dodano dużo bardziej czytelną składnię dla funkcji wyższego rzędu, zrezygnowano z plików nagłówkowych (modyfikatory dostępu definiuje się podobnie jak w Javie czy C#). Dodatkowo, najczęściej używane struktury składniowe otrzymały prostsze formy w postaci cukru syntaktycznego, np:

- definicja zmiennej `var x: Int?` jest tożsama z `var x: Optional<Int>`
- konstrukcja `if let` jest cukrem syntaktycznym dla wyrażenia `switch`, wywołanego na obiekcie typu `Optional<T>`
- Swift 2.2 wprowadził cukier syntaktyczny dla selektorów (obiektów zawierających informacje pozwalające wywoływać na obiektach funkcje w runtime)
- pattern matching dla typów wyliczeniowych i krotek to bardzo mocno rozwinięty cukier syntaktyczny dla instrukcji warunkowych dla tych typów

3.2.2. System typów

Oba omawiane języki są językami statycznie typowanymi, jest jednak pomiędzy nimi kilka istotnych różnic:

- w Swiftcie w zasadzie nie występuje niejawne rzutowanie typów. Każde (nawet najprostsze, jak rzutowanie z typu całkowitoliczbowego na zmiennoprzecinkowy) musi być jawnie wywołane przez programistę. W Objective-C zasady rzutowania zostały odziedziczone z języka C i są w zasadzie takie same.
- sposób wywoływania metod w Objective-C został zaczerpnięty z języka Smalltalk i odbywa się poprzez wysyłanie wiadomości (ang. *message*) do obiektu. Z tego względu rozwiązywanie, którą funkcję należy wywołać dzieje się w metodzie `objc_msgSend` w trakcie działania programu. W Swiftcie natomiast wywołania metod opierają się na wskaźnikach do metod oraz tablicy *Protocol Witness Table* (odpowiednik *vtable* z C++).
- w Objective-C istnieje klasa `NSObject`, która jest superklasą dla wszystkich innych klas. Swift nie posiada takiej superklasy, została ona zastąpiona protokołem `AnyObject`.

3.2.3. Wywołania metod

Język Swift obsługuje dwa rodzaje wywołań metod: statyczne (ang. *direct dispatch* lub *static dispatch*) i dynamiczne (ang. *table dispatch* lub *dynamic dispatch*). Oprócz tego, ze względu na możliwość użycia kodu Objective-C w Swift, programista może również używać wywoływania poprzez wiadomości (ang. *message dispatch*), które jest jedynym sposobem wywoływania w starszym z języków.

Wywoływanie statyczne jest uznawane za najszybszy sposób wykonywania metod. Główną cechą jest pełna wiedza o tym, która metoda ma zostać wykonana już w trakcie procesu kompilowania. Z tego powodu, kompilator może stosować dużą ilość optymalizacji, takich jak bezpośrednie odwołania do adresu funkcji czy wywołanie funkcji "w linii" (ang. *inline*). Główną jej wadą jest natomiast ograniczone wsparcie dla polimorfizmu, przez co większość języków implementuje dodatkowo inny rodzaj wywoływania metod (np. tablice wirtualne w C++). W Swift wywoływanie statyczne jest używane dla struktur oraz rozszerzeń protokołów (ang. *protocol extensions*).

Wywołanie dynamiczne to mechanizm zaimplementowany w większości współczesnych obiektowych języków programowania. Jego działanie opiera się na tablicach wirtualnych. W Swift istnieją dwa rodzaje tablic wirtualnych:

- *virtual dispatch tables* - tablice wirtualne tworzone dla klas i służące do wywoływania odpowiednich metod klasy. Dzięki nim, możliwe jest dziedziczenie i przeładowywanie metod w klasach dziedziczących.
- *witness tables* - tablice wirtualne tworzone dla każdego typu implementującego protokół. Dzięki nim możliwe jest użycie protokołów.

Zaletą takiego podejścia jest jego elastyczność, która umożliwia zaimplementowanie takich elementów języka, jak dziedziczenie czy protokoły. Wadą natomiast jest dodatkowy czas, potrzebny na wyszukanie adresu funkcji w tablicy wirtualnej w trakcie działania programu. Uniemożliwia też stosowanie niektórych metod optymalizacji kodu. W Swift wywoływanie dynamiczne jest domyślnie używane dla klas oraz protokołów.

Wywołanie przez wysyłanie wiadomości to mechanizm odziedziczony z Objective-C i używany głównie w trakcie wywoływania kodu Objective-C. Jest uważany za najwolniejszy z trzech dostępnych sposobów wywoływania metod, wspiera jednak funkcje języka, bez których niemożliwe byłoby używanie klas i bibliotek napisanych w Objective-C z poziomu kodu swiftowego.

Wywołanie przez wysyłanie wiadomości jest najrzadziej spotykanym podejściem z trzech wymienionych w tym rozdziale. Jego działanie jest podobne do wywołania dynamicznego, ma jednak kilka różnic, o których warto wspomnieć.

Aby wysłanie wiadomości było możliwe, kompilator musi wykonać kilka kroków preprocessingu kodu Objective-C. Po pierwsze, do każdego obiektu kompilator dodaje właściwość `isa` typu `objc_class *`. Typ `objc_class` to klasyczna struktura z języka C reprezentująca klasę Objective-C. Zawiera takie dane jak nazwa klasy, wskaźnik na obiekt `objc_class` superklasy, lista właściwości danej klasy, lista metod czy zaimplementowanych protokołów.

Następnie, każda metoda zostaje przetłumaczona na funkcję języka C, postaci:

```
ZwracanyTyp* nazwaFunkcji(id self, SEL _cmd, args...)
```

Argument `self` jest wskaźnikiem na obiekt, które jest odbiorcą wiadomości, `_cmd` to selektor danej metody, a pozostałe argumenty to parametry wywołania funkcji. Selektor (ang. *selector*) to unikalna nazwa każdej metody zdefiniowanej w kodzie Objective-C reprezentowana w kodzie C o Objective-C przez typ `SEL`.

Ostatnim krokiem jest utworzenie dla każdej klasy Objective-C tablicy przyporządkowującej selektorom danej klasy wskaźniki na odpowiednie funkcje opisane w poprzednim punkcie. W ten sposób, w trakcie działania programu, środowisko uruchomieniowe może znaleźć odpowiednią implementację dla danego selektora.

Wysyłanie wiadomości odbywa się za pomocą funkcji `objc_msgSend`. W momencie, gdy kompilator napotyka instrukcję wysyłania wiadomości, taką jak np.:

```
Element *element = ...;
BinarySearchTreeObjC *tree = ...
[tree addElement:element];
```

zamienia ją na wywołanie:

```
objc_msgSend(tree, @selector(addElement:), element);
```

Pierwszy argument to odbiorca wiadomości, drugi argument to selektor wywoływanej funkcji (`@selector` to dyrektywa kompilatora służąca do zamiany nazwy funkcji z ciągu znaków na selektor), a pozostałe to parametry wywołania funkcji.

Cała obsługa wysyłania wiadomości w trakcie działania programu jest wykonywana przez funkcję `objc_msgSend`. Jej głównym zadaniem jest powiązanie wywołanego selektora z odpowiednią implementacją. Dzieje się to według następujących kroków:

1. Weź wskaźnik na obiekt `isa` dla odbiorcy wiadomości.
2. Sprawdź, czy w cache’u jest wskaźnik na funkcję dla wywoływanego selektora. Jeśli tak, wywołaj funkcję i zakończ procedurę.
3. Jeśli w cache’u nie ma informacji o funkcji dla danego selektora, sprawdź sprawdź tablicę metod danej klasy. Jeśli znajduje się tam wskaźnik na funkcję dla wywoływanego selektora, wywołaj tą funkcję i zakończ procedurę.
4. Jeśli w tablicy metod nie ma informacji o funkcji dla zadanego selektora, weź z obiektu `isa` dane o superklasie i wykonaj całą procedurę dla superklasy.

Jak widać, pomimo prostego założenia dla funkcji `objc_msgSend` ("weź wskaźnik na funkcję i ją wywołaj"), szczegóły implementacyjne czynią ją bardzo skomplikowaną. Jest w niej zawarta nie tylko obsługa sytuacji brzegowych, takich jak wyszukiwanie implementacji w hierarchii klas czy puste wskaźniki (o wartości `nil`), ale również wiele optymalizacji, jak np. użycie cache czy częściowa implementacja w assemblerze. Złożoność tej funkcji sprawia, że w większości testów opisanych w kolejnych rozdziałach tej pracy, będzie ona miała duży wpływ na szybkość wykonywania kodu napisanego w Objective-C.

W niektórych przypadkach czas wykonywania funkcji `objc_msgSend` jest na tyle duży, że zachodzi potrzeba jego optymalizacji. Najbardziej efektywnym sposobem jest pominięcie wywoływania tej funkcji poprzez ograniczenie ilości wysyłanych wiadomości. Ponieważ każda metoda Objective-C jest w trakcie kompilacji tłumaczona na procedurę języka C, można za pomocą metody `methodForSelector:` znaleźć wskaźnik do implementacji (czyli *de facto* wskaźnik na funkcję w C) dla danego selektora i wywoływać wprost taką funkcję, z pominięciem całego mechanizmu wiadomości. Opisany tutaj sposób jeszcze szczególnie wydajny w sytuacji, gdy pojedyncza metoda jest wywoływana wiele razy dla różnych instancji tej samej klasy (patrz test 4.5.). Innym sposobem może być używanie zwykłych zmiennych zamiast właściwości.

Pomimo, że istnieją metody poprawiające wydajność wywoływania metod w Objective-C i są znane dla większości doświadczonych programistów, są one rzadko

stosowane. Głównym powodem jest możliwość użycia czystego języka C do zaimplementowania niskopoziomowych bibliotek i funkcji. Użycie C jest lepszym wyborem nie tylko z punktu widzenia szybkości działania, ale również możliwości użycia takiej biblioteki z poziomu innych języków programowania. Dlatego też fragmenty aplikacji, które mają działać bardzo szybko są zwykle pisane w C.

3.2.4. Bezpieczeństwo

Jednym z podstawowych założeń przyjętych przy tworzeniu Swifta było stworzenie języka, który będzie chronił programistę przed najczęstszymi błędami popełnianymi podczas pisania kodu. Najważniejsze mechanizmy służące temu celowi to:

- typ `Optional<T>` - typ ten chroni przed wszelkimi błędami związanymi z wartością `nil`
- konieczność inicjalizacji obiektu - każdy obiekt musi zostać zainicjalizowany w trakcie zadeklarowania referencji, co zapobiega problemom z dostępem do jeszcze nie zainicjalizowanej pamięci
- generyczne struktury danych - Objective-C nie posiadało typów generycznych, przez co struktury danych mogły przechowywać wartości różnych typów, co z kolei powodowało konieczność sprawdzania typów. W Swift, każda struktura danych posiada generyczny parametr, który definiuje, jakie obiekty są przechowywane w danej strukturze. Struktura taka może zawierać tylko obiekty zadeklarowanego typu, obiekty typu dziedziczącego po zadeklarowanym typie lub - jeśli zadeklarowany typ jest protokołem - obiekty typu implementującego dany protokół
- preferowanie niemutowalnych obiektów - Swift posiada kilka mechanizmów, które nakłaniają programistę do używania niemutowalnych obiektów. Przykładowo, istnieje słowo kluczowe `let`, które służy do tworzenia obiektów stałych (niemutowalnych) i które - zgodnie z konwencją przyjętą przez programistów - powinno być używane jako domyślny sposób tworzenia obiektów i deklarowania właściwości obiektu. W przypadku struktur, definicja każdej metody, która zmienia stan obiektu, musi zostać poprzedzona słowem `mutating`. Struktury są przekazywane do funkcji "przez wartość", co sprawia, że domyślnie są niemodyfikowalne. A ponieważ większość typów z biblioteki standardowej jest zaimplementowanych jako struktury, więc typy, takie jak `Array<T>` czy `String` również wspierają wyżej wymienione mechanizmy.
- preferowanie typów wartościowych nad referencyjne - typy wartościowe zapobiegają zmianom jednego obiektu z wielu miejsc, przez co czytelność i łatwość zrozumienia kodu jest większa

- automatyczne sprawdzanie przekroczenia zakresu liczb całkowitych
- zmiany w składni, takie jak: obowiązkowe nawiasy `{...}` dla ciał funkcji warunkowych i pętli, obsługa wszystkich możliwych wartości dla typów wyliczeniowych, konieczność zwrócenia wartości w funkcjach, które deklarują zwracany typ, brak instrukcji `goto` itp.

Rozdział 4.

Testy

4.1. Metodologia badań

Celem niniejszej pracy magisterskiej jest porównanie wydajności języka Swift z językiem Objective-C oraz podjęcie próby odpowiedzenia na pytanie, co jest przyczyną takiego stanu.

W sieci Internet dostępnych jest kilka źródeł, które porównują Swift z innymi językami programowania. Jedne z największych pod względem ilości przeprowadzonych testów to:

- The Computer Language Benchmarks Game ¹
- Programming Language Benchmarks ²
- Wpis na blogu firmy Yalantis ³
- Wpis na blogu Thomasa Günzela ⁴

Większość z wymienionych stron internetowych porównuje więcej niż jeden język programowania. Duża część nie zawiera testów w języku Swift i/lub Objective-C, co powoduje, że nie można na ich podstawie stwierdzić, który z tych dwóch języków jest szybszy. Wyniki tam przedstawione opierają się głównie na zadaniach algorytmicznych pokazujących ogólną wydajność i nie są szczegółowo analizowane, co z kolei nie pozwala odpowiedzieć na pytanie, dlaczego wydajność jest taka, a nie inna.

Testy napisane na potrzeby tej pracy magisterskiej nawiązują do wyżej wymienionych metodologii, jednak ze względu na nieco inne założenia pracy zostały odpowiednio zmodyfikowane. Każdy test sprawdza wydajność pojedynczego elementu

¹<https://benchmarksgame-team.pages.debian.net/benchmarksgame>

²<https://attractivechaos.github.io/plb/>

³<https://yalantis.com/blog/is-swift-faster-than-objective-c/>

⁴<https://thomasguenzel.com/blog/2015/12/01/a-small-speed-comparison-objective-c-and-swift/>

języka. Przykładowo, obliczanie n -tej liczby ciągu Fibonacciego (w naiwny sposób, rozdział 4.4.) pokazuje wydajność wykonywania wielokrotnie zagnieżdżonych wywołań rekurencyjnych, a test różnych sposobów wywoływania metod (rozdział 4.7.) sprawdza, który mechanizm wywoływania jest najszybszy. Testy opisane w tej pracy są prostsze i mniej złożone niż te, które można znaleźć w ww. źródłach, skupiają się za to mocno na konkretnej funkcjonalności języka, co pozwala na łatwiejszą analizę i wyciągnięcie wniosków odnośnie tej funkcjonalności.

Wszystkie testy zostały dokładnie przeanalizowane pod kątem przyczyn otrzymanych wyników. W ten sposób uzyskano otrzymano listę elementów języka Swifta sprawiających, że jest bardziej wydajny od Objective-C. Wyniki te stanowią wartość nie tylko naukową, ale i praktyczną, ponieważ mogą być zastosowane przez programistów jako wskazówki podczas pisania dobrze zoptymalizowanych programów.

4.2. Założenia i platforma testowa

Wszystkie implementacje w obrębie danego testu używają tego samego algorytmu do rozwiązania zadanego problemu. Również zakres wartości, dla których przeprowadzono test jest stały w obrębie danego testu. Dla każdej wartości n zostało przeprowadzone co najmniej 10 pomiarów. Wyniki przedstawione na wykresach są średnimi tych pomiarów.

Każdy test został zaimplementowany w co najmniej jednej wersji dla każdego z języków. Analiza testu składa się z kilku części:

- opisu problemu przedstawionego w teście
- przedstawienia wyników w formie wykresu i/lub tablicy profilowania
- analizy wyników
- (opcjonalnie) dodatkowych testów sprawdzających wnioski wyciągnięta podczas analizy wyników

Kod testów, razem z platformą potrzebną do ich uruchomienia znajduje się w repozytorium dostępnym w serwisie GitHub pod adresem <https://github.com/vyeczorny/mgr>. Wszystkie testy opisane w tej pracy zostały przeprowadzone na laptopie Macbook Pro o następującej specyfikacji:

- procesor: Intel Core I7-7700HQ 2,8 GHz
- pamięć RAM: 16 GB LPDDR3
- system operacyjny macOS High Sierra 10.13.1
- wersja Swift: 4.0.3 (swiftlang-900.0.74.1 clang-900.0.39.2)

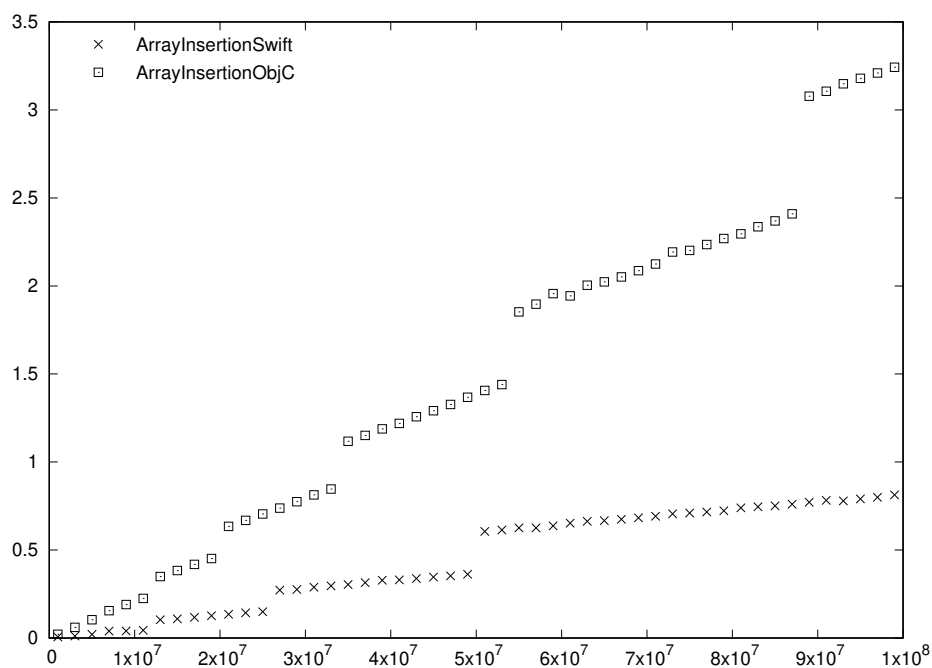
- wersja LLVM: 9.0.0 (clang-900.0.39.2)

4.3. Wstawianie elementu do tablicy

4.3.1. Omówienie

Test polega na dodaniu do pustej tablicy n elementów. Ma on na celu sprawdzenie wydajności tablic na podstawie jednej z podstawowych operacji: wstawiania elementu do tablicy. Kod testów dla obu omawianych języków znajduje się w plikach `ArrayInsertionTest.swift` oraz `ArrayInsertionTest.m`, a wyniki przedstawione zostały na wykresie 4.1. Z wykresu wynika, że w obu językach dodawanie elementów do tablicy jest operacją działającą w czasie asymptotycznie liniowym, w języku Swift jest on jednak czterokrotnie krótszy.

Tak jak większość popularnych języków, zarówno Objective-C, jak i Swift zapewniają ciągłość pamięci tablicy. Z wykresu wynika, że oba języki rezerwują zaawczasu większą ilość pamięci niż jest rzeczywiście potrzebna, a w razie przekroczenia już zajętej pamięci zwiększają rozmiar eksponencjalnie, robią to jednak w różnych momentach.



Rysunek 4.1: Wykres czasu działania testu `ArrayInsertionTest` dla obu języków

4.3.2. Analiza działania

Rysunek 4.2 przedstawia wyniki profilowania w programie Instruments testu `ArrayInsertion` dla $n = 200000000$. Zgodnie z wykresem 4.1, czas działania te-

Weight ▾	Self Weight	Symbol Name
2.04 s 100.0%	748.00 ms	▼ArrayInsertionTestSwift.run() Benchmarks
1.05 s 51.5%	0 s	▼specialized Array._copyToNewBuffer(oldCount:) Benchmarks
1.05 s 51.5%	0 s	▼specialized _ArrayBufferProtocol._arrayOutOfPlaceUpdate(.,.:,.:) Benchmarks
930.00 ms 45.7%	930.00 ms	_platform_memmove\$VARIANT\$Haswell libsystem_platform.dylib
120.00 ms 5.8%	0 s	▼_swift_release_dealloc libswiftCore.dylib
115.00 ms 5.6%	0 s	▼_swift_release_dealloc libswiftCore.dylib
103.00 ms 5.0%	0 s	▼specialized protocol witness for Collection.formIndex(after:) in conformance <> Range<A> Benchmarks
103.00 ms 5.0%	0 s	▼specialized Range<>.index(after:) Benchmarks
103.00 ms 5.0%	103.00 ms	protocol witness for Strideable.advanced(by:) in conformance Int Benchmarks
19.00 ms 0.9%	19.00 ms	protocol witness for static Equatable.== infix(.,.:) in conformance Int Benchmarks

Weight ▾	Self Weight	Symbol Name
6.59 s 100.0%	0 s	▼specialized TestInstanceRunner.runTest(withName:n:numberOfRepetitions:) Benchmarks
5.00 s 75.9%	330.00 ms	▼-[ArrayInsertionTestObjC run] Benchmarks
3.82 s 58.0%	1.06 s	▼-[NSArrayM insertObject:atIndex:] CoreFoundation
1.62 s 24.5%	1.62 s	_platform_memmove\$VARIANT\$Haswell libsystem_platform.dylib
942.00 ms 14.2%	942.00 ms	_platform_bzero\$VARIANT\$Haswell libsystem_platform.dylib
199.00 ms 3.0%	0 s	▼free_large libsystem_malloc.dylib
300.00 ms 4.5%	300.00 ms	-[NSArrayM addObject:] CoreFoundation
170.00 ms 2.5%	170.00 ms	+([NSNumber numberWithInt:] Foundation
138.00 ms 2.0%	138.00 ms	objc_retainAutoreleasedReturnValue libobjc.A.dylib
114.00 ms 1.7%	114.00 ms	objc_retain libobjc.A.dylib
69.00 ms 1.0%	69.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
59.00 ms 0.8%	59.00 ms	-[ArrayInsertionTestObjC n] Benchmarks
1.06 s 16.1%	1.06 s	objc_msgSend libobjc.A.dylib
272.00 ms 4.1%	0 s	▼-[NSArrayM dealloc] CoreFoundation
153.00 ms 2.3%	153.00 ms	cow_cleanup CoreFoundation
119.00 ms 1.8%	0 s	▼free_large libsystem_malloc.dylib
160.00 ms 2.4%	0 s	▼<Unknown Address>
50.00 ms 0.7%	50.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
44.00 ms 0.6%	44.00 ms	+([NSNumber numberWithInt:] Foundation
40.00 ms 0.6%	40.00 ms	-[ArrayInsertionTestObjC n] Benchmarks
21.00 ms 0.3%	21.00 ms	-[NSArrayM insertObject:atIndex:] CoreFoundation
4.00 ms 0.0%	4.00 ms	objc_retain libobjc.A.dylib
53.00 ms 0.8%	53.00 ms	DYLD-STUB\$\$objc_retainAutoreleasedReturnValue Benchmarks
38.00 ms 0.5%	38.00 ms	-[NSArrayM addObject:] CoreFoundation

Rysunek 4.2: Tablica profilowania dla testu ArrayInsertion (u góry - Swift, na dole - Objective-C)

stu w języku Objective-C jest ponad trzykrotnie dłuższy niż takiego samego testu w Swift. Tablica profilowania wskazuje potencjalne powody takiego stanu:

- Kod funkcji `run` w teście języka Objective-C składa się z utworzenia modyfikowalnej tablicy (operacja ta ma znikomy czas, nie została wylistowana na tablicy profilowania) oraz pętli `for` przebiegającej od 0 do `n`, gdzie `n` jest liczbą obiektów dodanych do tablicy. W związku z tym można założyć, że czas działania pętli `for` to czas działania funkcji `run` (oznaczony na tablicy profilowania jako *Self Weight*) plus czas dostępu do właściwości przetrzymującej ilość elementów `n` (kolor jasnoniebieski na tablicy). Sumarycznie czas ten wynosi *429ms*. Kod testu dla języka Swift jest bardzo podobny, jedyną różnicą jest zastąpienie klasycznej pętli `for` pętlą `for...in`, która w swojej implementacji używa metody `formIndex(after:)` z protokołu `Collection` i jego odpowiednich implementacji. Samo użycie tego protokołu wymaga *103ms* (instrukcje oznaczone kolorem jasnoniebieskim na tablicy profilowania), czas działania samej funkcji `run` to z kolei *748ms*, co daje łączny czas *851ms*, czyli prawie dwukrotnie dłuższy niż w przypadku języka Objective-C. Zatem prostota pętli w Objective-C sprawia, że są one bardziej wydajne.
- W Objective-C kod funkcji `addObject` został `inline`'owany do wywołań metod `insertObject:atIndex` oraz `addObject` klas wewnętrznych. Łączny czas wywołań tych dwóch metod to *4,14s*, z czego aż *2,56s* program spędził na przenoszeniu i zerowaniu pamięci. W Swift metoda `append` również została `inline`'owana do metody prywatnej `_copyToNewBuffer(oldCount:)`, jej czas wywołania to jedynie *1.05s*, w tym *930ms* to czas wywołań systemowej funkcji przenoszenia pamięci. Można więc wyciągnąć wniosek, że sama implementacja tych metod jest mniej wydajna w Objective-C.
- Wywołania metody `objc_msgSend` potrzebuje *1,06s*.
- Dealokowanie zajętej już pamięci (kolor czerwony na rysunku) zajmuje mniej czasu w Swift (*235ms*) niż w Objective-C (*471ms*).
- Jak wspomniano w rozdziale 3.1.2., ARC jest rozszerzeniem języka dodanym kilkanaście lat po premierze samego Objective-C, przez co w tablicy profilowania widnieją metody przeznaczone do tego zadania, takie jak `objc_retain` czy `objc_release` (kolor żółty na rysunku). Jak widać, ich wywołania zajmują około 6,5% czasu wykonywania całego programu (*428ms*). Liczby całkowite w Swift są typami wartościowymi, stąd nie wymagane jest dla nich zliczanie referencji w tym języku.
- Tablice w Objective-C mogą zawierać tylko obiekty dziedziczące po klasie `NSObject`. Typ całkowitoliczbowy, jest typem prostym, należy go zatem schować w obiekcie klasy `NSNumber`, który można dodać do tablicy. Taka operacja to jednak dodatkowe *214ms* do czasu działania programu (kolor różowy).

4.3.3. Podsumowanie

Powyższy test pokazał, że implementacja wstawiania elementów do tablicy w języku Swift jest szybsza niż w Objective-C. Najwięcej czasu implementacja w Objective-C przenosiła i zwalniała zasoby. Na te operacje poświęcone zostało aż 3,03s całego czasu działania programu. W przypadku Swift było to tylko 1,17s. Wydaje się więc, że zarządzanie pamięcią w tej strukturze danych zostało znacznie ulepszone w Swift.

Drugim znaczącym czynnikiem, przez który implementacja w Objective-C jest wolniejsza od Swift jest aspekt obiektowy tego języka. Użycie obiektów w Objective-C oraz komunikacja pomiędzy nimi powodują spory narzut na wydajność, który widoczny jest w wywołaniach metody `objc_msgSend`, opakowywaniu typu prostego `int` w tym obiektowy `NSNumber` czy pobieraniu wartości zmiennej `n` z właściwości klasy. Operacje te łącznie zajęły 1,37s, co jest równe 2/3 czasu wykonywania całego testu w Swift. Z tematem obiektowości wiąże się również obsługa zliczania referencji, która będzie wpływać na zmniejszenie wydajności tablic (a w zasadzie dowolnej struktury danych), niezależnie od rodzaju przeprowadzanych operacji.

Jedyna część testu, w której implementacja w starszym języku wypada lepiej to obsługa pętli `for`, która jest w zasadzie elementem języka C, na którym bazuje Objective-C.

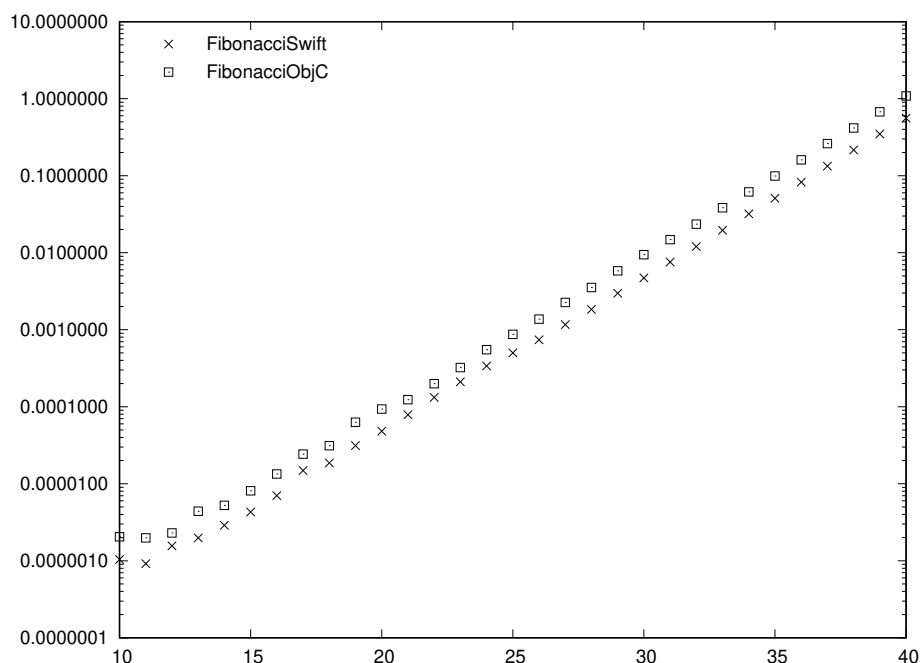
4.4. Rekurencyjne obliczanie liczby Fibonacciego

4.4.1. Omówienie

Test polega na obliczeniu n -tej liczby Fibonacciego za pomocą naiwnego algorytmu rekurencyjnego. Głównym celem tego testu jest sprawdzenie, jak omawiane języki radzą sobie z dużą ilością zagnieżdżonych wywołań rekurencyjnych. Kod obu testów znajduje się w plikach `FibonacciTest.m` oraz `FibonacciTest.swift`. Wyniki obu testów dla wartości $n \in < 5, 40 >$ zostały zwizualizowane na wykresie 4.3. Czas działania obu programów rośnie oczywiście wykładniczo, z wykresu wynika jednak, że program napisany w Swift jest szybszy. Pomiary wskazują, że kod swiftowy potrzebuje około 40% mniej czasu na wykonanie niż jego odpowiednik napisany w Objective-C.

4.4.2. Analiza działania

Tablica profilowania 4.4 obu programów pozwala znaleźć powody różnicy prędkości pomiędzy implementacjami. Główną różnicą jest wywołanie funkcji `objc_msgSend` w teście napisanym w Objective-C. Wywołania te są odpowiedzialne za ponad 5 sekund czasu działania testu, co daje prawie 37% całego czasu działania



Rysunek 4.3: Wykres czasu działania testu FibonacciTest dla obu języków

testu. Więcej o wywoływaniu metod w Objective-C napisano w sekcji 3.2.2. Przykład ten dobrze obrazuje problemy z wydajnością języka Objective-C przy bardzo dużej ilości wywołań metod klas.

Drugim powodem, dla którego kod napisany w Objective-C jest wolniejszy jest samo działanie ciała metody `[fibonacciForN:]`, które jest o ponad 2 sekundy wolniejsze od analogicznego kodu napisanego w Swift. Ciało tej metody w obu implementacjach jest bardzo proste i składa się jedynie z instrukcji warunkowej `if/else` oraz dwóch porównań liczb całkowitych. Obie implementacje składają się z dokładnie takich samych instrukcji, wynika z tego, że translacja tych instrukcji do kodu wynikowego jest lepiej zoptymalizowana w nowszym języku.

Weight▼	Self Weight	Symbol Name
7.05 s 100.0%	0 s	▼FibonacciTestSwift.run() Benchmarks
7.05 s 100.0%	6.84 s	▼FibonacciTestSwift.fibonacci(n:) Benchmarks
208.00 ms 2.9%	0 s	▼<Unknown Address>
208.00 ms 2.9%	208.00 ms	FibonacciTestSwift.fibonacci(n:) Benchmarks
Weight▼	Self Weight	Symbol Name
13.98 s 100.0%	8.62 s	▼-[FibonacciTestObjC fibonacciForN:] Benchmarks
5.15 s 36.8%	5.15 s	objc_msgSend libobjc.A.dylib
204.00 ms 1.4%	0 s	▼<Unknown Address>
204.00 ms 1.4%	204.00 ms	-[FibonacciTestObjC fibonacciForN:] Benchmarks

Rysunek 4.4: Tablica profilowania dla testu ArrayInsertion (u góry - Swift, na dole - Objective-C)

Podsumowanie

Powyższy test pokazuje, że przy dużej ilości wywołań rekurencyjnych lepiej radzi sobie Swift. Głównym powodem jest brak narzutu związanego z wysyłaniem wiadomości do obiektów oraz lepsza optymalizacja tłumaczenia kodu Swiftowego do kodu platformy LLVM.

4.5. Sortowanie bąbelkowe

4.5.1. Omówienie

Sortowanie bąbelkowe to jeden z najprostszych algorytmów sortowania. Jego największą zaletą jest bardzo prosta i intuicyjna implementacja. Test opisany w tym rozdziale polega na zaimplementowaniu algorytmu sortowania bąbelkowego i uruchomieniu go na tablicy o wielkości $n \in \langle 1000, 15000 \rangle$ wypełnionej losowymi 32-bitowymi liczbami całkowitymi. Jego zadaniem jest sprawdzenie wydajności operacji na tablicach.

4.5.2. Analiza działania

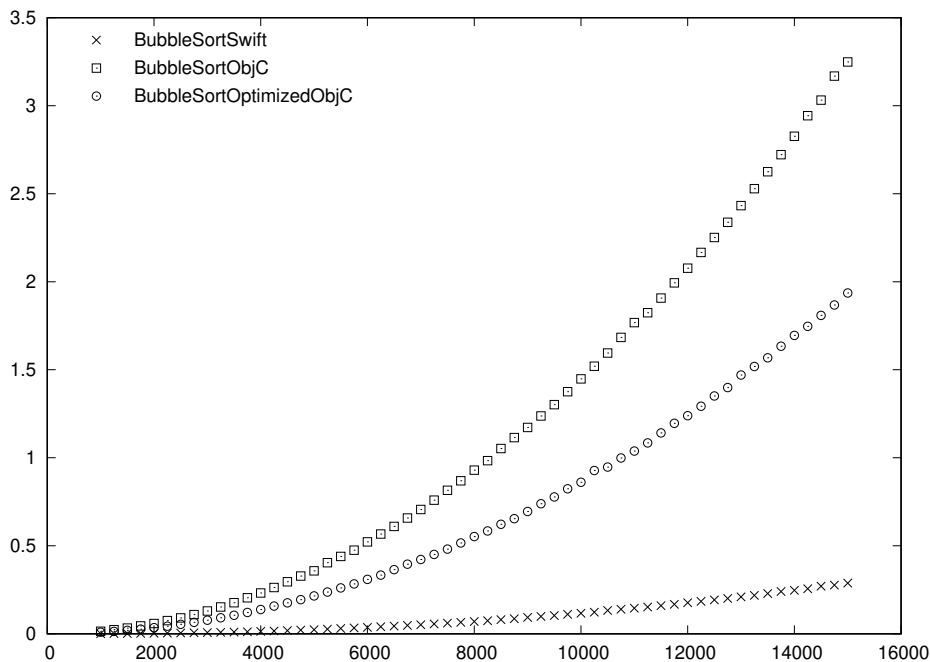
Jak wynika z wykresu, implementacja w Swift jest ponad 10-krotnie szybsza niż najprostsza implementacja w Objective-C. Posortowanie tablicy 15000 elementów zajmuje $288ms$ w przypadku kodu w Swift i $3,2s$ dla Objective-C.

Rysunek 4.6 przedstawia tablicę profilowania testu `BubbleSort` zaimplementowanego w języku Swift (na górze) oraz w Objective-C (po środku) dla tablicy z 30000 elementów.

Tablica profilowania testu napisanego w języku Swift jest bardzo krótka - aż 93% czasu wykonywania testu zajęły dwie operacje:

- około $0,5s$ zajęło porównywanie elementów w tablicy (oznaczone kolorem czerwonym)
- wywołanie operacji zdefiniowanych w samej metodzie `BubbleSort(:_)` zajęło około $800ms$. Te operacje to obsługa pętli `for`, operacje arytmetyczne związane z przesuwaniem indeksów oraz zamiana elementów w tablicy.

Analiza implementacji w Objective-C jest nieco bardziej skomplikowana. Najwięcej czasu zajęło wysyłanie wiadomości do obiektów za pomocą metody `objc_msgSend` (oznaczonej kolorem żółtym na tablicy profilowania). Czas wszystkich wywołań tej metody wyniósł $4,58s$.



Rysunek 4.5: Wykres czasu działania testu BubbleSortTest dla obu języków

Drugą najbardziej czasochłonną grupą operacji były operacje odczytu i zapisu do/z tablicy (kolorem zielony na tablicy profilowania). Metody `objectAtIndexedSubscript:` i `setObject:atIndexedSubscript` są wywoływane po użyciu operatora indeksowania na tablicy `NSArray` i łącznie czas ich wywołania zajmuje 4,31s.

Wykonanie operacji z ciała metody `run` (kolor czerwony), trwało łącznie 2,5s. Operacje te to głównie obliczenia arytmetyczne oraz obsługa pętli `for`. Wywołania funkcji oznaczone kolorem niebieskim na tablicy profilowania dotyczą zarządzania licznikami referencji i łącznie potrzebują również prawie 2,5s.

Ciekawym przypadkiem pokazującym kosztowność systemu wysyłania wiadomości jest sprawdzanie wartości zapisanej do właściwości `n`. W Objective-C dla każdej właściwości o nazwie `x` kompilator generuje:

- zmienną o nazwie `_x`
- getter o nazwie `x`
- setter `setX:`

Z tego powodu, odczytanie wartości z właściwości `n` jest tak naprawdę wywołaniem metody `n` i odczytaniem wartości zmiennej ukrytej za właściwością. Z punktu widzenia kompilatora, odczyt taki jest zatem niczym innym jak wywołaniem metody, czyli wysłaniem wiadomości, stąd też samo odczytanie zmiennej zajmuje 172ms (kolor szary na tablicy profilowania).

Weight▼	Self Weight	Symbol Name
1.39 s 100.0%	0 s	▼BubbleSortTestSwift.run() Benchmarks
1.39 s 99.9%	0 s	▼BubbleSortTestSwift.bubbleSort(,:) Benchmarks
1.39 s 99.9%	801.00 ms	▼specialized BubbleSortTestSwift.bubbleSort(,:) Benchmarks
499.00 ms 35.8%	499.00 ms	protocol witness for static Equatable,== infix(.,:) in conformance Int Benchmarks
92.00 ms 6.6%	92.00 ms	specialized Array._getElement(,wasNativeTypeChecked:matchingSubscriptCheck:) Benchmarks
1.00 ms 0.0%	1.00 ms	os_unfair_lock_unlock libsystem_platform.dylib

Weight▼	Self Weight	Symbol Name
14.20 s 100.0%	0 s	▼-[BubbleSortTestObjC run] Benchmarks
9.42 s 66.3%	2.53 s	▼-[BubbleSortTestObjC bubbleSortWithArray:] Benchmarks
2.51 s 17.6%	2.51 s	-[_NSArrayM objectAtIndexedSubscript:] CoreFoundation
1.80 s 12.6%	1.80 s	-[_NSArrayM setObject:atIndexedSubscript:] CoreFoundation
837.00 ms 5.8%	837.00 ms	objc_retain libobjc.A.dylib
808.00 ms 5.6%	808.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
766.00 ms 5.3%	766.00 ms	objc_retainAutoreleasedReturnValue libobjc.A.dylib
172.00 ms 1.2%	172.00 ms	-[BubbleSortTestObjC n] Benchmarks
4.58 s 32.2%	4.58 s	objc_msgSend libobjc.A.dylib
151.00 ms 1.0%	151.00 ms	DYLD-STUB\$\$objc_retainAutoreleasedReturnValue Benchmarks
43.00 ms 0.3%	0 s	▼<Unknown Address>
30.00 ms 0.2%	30.00 ms	-[_NSArrayM objectAtIndexedSubscript:] CoreFoundation
6.00 ms 0.0%	6.00 ms	objc_retain libobjc.A.dylib
5.00 ms 0.0%	5.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
1.00 ms 0.0%	1.00 ms	-[BubbleSortTestObjC n] Benchmarks
1.00 ms 0.0%	1.00 ms	-[_NSArrayM setObject:atIndexedSubscript:] CoreFoundation
1.00 ms 0.0%	1.00 ms	arc4random libsystem_c.dylib
1.00 ms 0.0%	1.00 ms	+([NSNumber numberWithIntUnsignedInt:]) Foundation

Weight▼	Self Weight	Symbol Name
8.20 s 100.0%	1.58 s	▼-[BubbleSortOptimizedTestObjC run] Benchmarks
1.83 s 22.3%	1.83 s	objc_msgSend libobjc.A.dylib
1.61 s 19.6%	1.61 s	-[_NSArrayM objectAtIndexedSubscript:] CoreFoundation
1.57 s 19.1%	1.57 s	-[_NSArrayM exchangeObjectAtIndex:withObjectAtIndex:] CoreFoundation
537.00 ms 6.5%	537.00 ms	objc_retain libobjc.A.dylib
528.00 ms 6.4%	528.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
523.00 ms 6.3%	523.00 ms	objc_retainAutoreleasedReturnValue libobjc.A.dylib
26.00 ms 0.3%	0 s	▼<Unknown Address>
24.00 ms 0.2%	24.00 ms	-[_NSArrayM exchangeObjectAtIndex:withObjectAtIndex:] CoreFoundation
2.00 ms 0.0%	2.00 ms	-[_NSArrayM objectAtIndexedSubscript:] CoreFoundation
1.00 ms 0.0%	0 s	▼arc4random libsystem_c.dylib
1.00 ms 0.0%	1.00 ms	DYLD-STUB\$\$_platform_memset libsystem_platform.dylib

Rysunek 4.6: Tablica profilowania dla testu BubbleSort (u góry - Swift, po środku - Objective-C, na dole - Objective-C po optymalizacjach)

Z powyższej analizy można łatwo wyznaczyć fragmenty kodu, które powinny zostać zoptymalizowane w implementacji w Objective-C:

- wywoływanie operatora indeksowania - zamiast zamieniać miejscami elementy za pomocą czterech wywołań operatora indeksowania, można użyć metody `exchangeObjectAtIndex:withObjectAtIndex:` klasy `NSArray`
- wysyłanie wiadomości do obiektów za pomocą `objc_msgSend` - metoda `exchangeObjectAtIndex:withObjectAtIndex:` jest za każdym razem wywoływana na tym samym obiekcie, dlatego też można już wcześniej wziąć wskaźnik na tą metodę (w nomenklaturze Objective-C - selektor), zachować referencję do niego i bezpośrednio wywoływać
- użycie właściwości `n` - zamiast przy każdym sprawdzeniu warunku pętli odwoływać się do właściwości `n`, można jej wartość zachować na stosie jako zmienną lokalną funkcji i odwoływać się do niej bezpośrednio

Klasa `BubbleSortOptimizedTestObjC` zawiera implementację wyżej wymienionych optymalizacji, wyniki działania zostały zawarte również na wykresie 4.5 oraz tablicy profilowania 4.6. Jak widać, zaproponowane optymalizacje znacznie przyspieszyły działanie algorytmu o około 40% względem kodu bez optymalizacji.

Największy przyrost wydajności zaobserwowano dla wywołań funkcji `objc_msgSend`, czas 4,58s udało się zmniejszyć do 1,83s (spadek o 60%). Główne powody to zastąpienie kilku wywołań operatora indeksowania jednym wywołaniem metody zamieniającej elementy miejscami oraz trzymanie referencji na tą metodę w zmiennej lokalnej. Spadł również czas wywołania metod związanych z operatorem indeksowania - pozbyto się zupełnie użycia metody ustawiającej wartość, a czas zużywany na metodę pobierającą wartość spadł z 2,51s do 1,61s. Łącznie czas operacji na tablicy spadł z 4,31s do 3,18s (spadek o 25%). Czas obsługi liczników referencji spadł z 2,4s do 1,6s, co oznacza spadek o około 35%, a czas poświęcony wcześniej na odczyt właściwości `n` spadła do wartości niezauważalnej podczas profilowania.

Pomimo tak znacznego przyspieszenia, kod ten nadal jest około 6-krotnie wolniejszy od jego odpowiednika w Swift. Implementacja w nowszym z języków zyskuje najwięcej na użyciu wartościowych typów danych, które nie wymagają zliczania referencji i wysyłania wiadomości pomiędzy obiektami oraz na znacznie szybszych operacjach tablicowych. Te dwa aspekty odpowiadają za ok. 80 % całkowitego czasu działania kodu Objective-C.

4.5.3. Podsumowanie

Powyższy test potwierdził wnioski z testu wstawiania elementów do tablicy - implementacja operacji tablicowych w Swift jest szybsza od tej w Objective-C.

Największy wpływ na wyniki tego testu miały dwie cechy nowego języka.

Po pierwsze, zastosowanie statycznego wywołania metod zamiast wywołania przez wiadomości pozwoliło ograniczyć narzut pochodzący z konieczności wysyłania wiadomości pomiędzy obiektami. Więcej o porównaniu sposobów wywoływania metod w teście 4.7.

Po drugie, zastosowanie typów wartościowych pozwoliło na znaczne zmniejszenie czasu poświęconego na obsługę ARC. Typy wartościowe są kopiowane podczas przypisań, inicjalizacji czy przekazania jako argument, zatem każdy obiekt takiego typu posiada tylko jedną referencję. Fakt ten sprawia, że obsługa licznika referencji jest zbędna - wystarczy usunąć obiekt z pamięci w momencie wyjścia z zakresu, w którym ten obiekt jest dostępny.

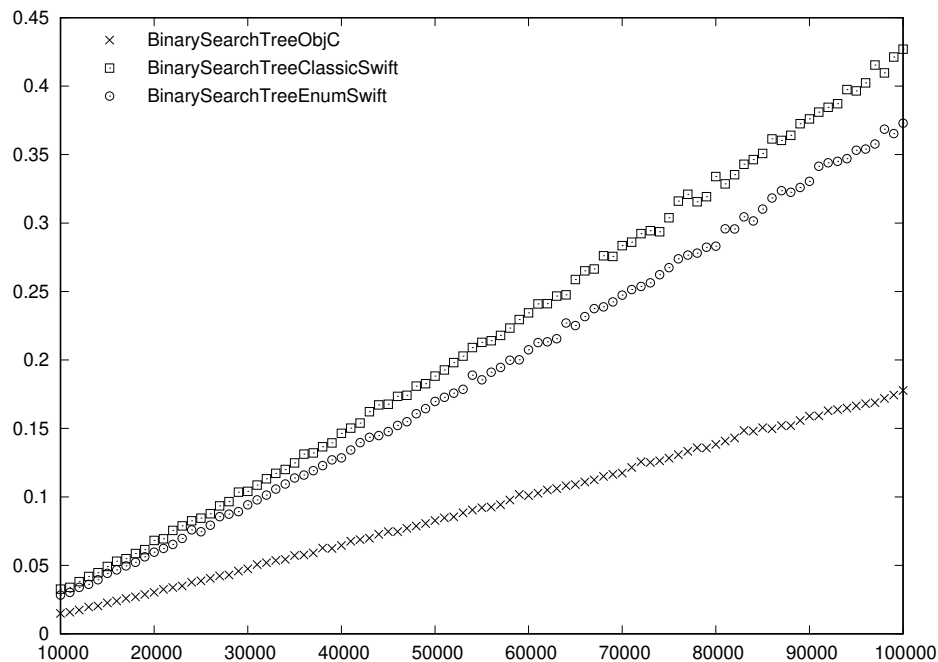
4.6. Budowanie binarnego drzewa poszukiwań

4.6.1. Omówienie

Test opisany w tym rozdziale polega na utworzeniu binarnego drzewa poszukiwań o n elementach. Jego głównym celem jest sprawdzenie, jaki narzut na wydajność ma użycie takich funkcji języka Swift, jak typy wyliczeniowe z wartościami powiązanymi czy wartościowe typy danych.

Implementacja w języku Objective-C jest klasyczną implementacją tego problemu. Zdefiniowana została struktura `Node` przechowująca wskaźniki na lewe i prawe poddrzewo oraz wartość przechowywaną w węźle.

Nieco ciekawiej wygląda kwestia implementacji algorytmu budowania drzewa w języku Swift. Po pierwsze, programiści Swift często przedkładają bezpieczeństwo i niezawodność kodu nad jego wydajność. Przykładowo, aby zapewnić bezpieczeństwo dostępu do danych (np. podczas dostępu z wielu wątków) stosuje się struktury niemutowalne. Po drugie, Swift oferuje dużo więcej narzędzi niż Objective-C, m.in. funkcje wyższego rzędu jako typy pierwszoklasowe ang. *first class citizens* czy algebraiczne typy danych w postaci typów wyliczeniowych z wartościami powiązanymi. Z tych dwóch powodów, poniższy test zawiera dwie implementacje w języku Swift. Obie zapewniają niemutowalność bieżących elementów drzewa - dodanie nowego elementu powoduje utworzenie nowego węzła, a nie zmodyfikowanie już istniejącego. Pierwsza implementacja to implementacja "klasyczna". Dane przechowywane są w klasie `Tree` (odpowiednik klasy `Node` z Objective-C), a metoda dodająca element przechodzi po drzewie i tworzy nowy obiekt typu `Tree` w odpowiednim miejscu. Druga implementacja jest oparta na wykorzystaniu typów wyliczeniowych z wartościami powiązanymi i wygląda nieco bardziej jak kod znany z języków funkcyjnych. Dane przechowywane są tutaj w typie wyliczeniowym `Tree`, który definiuje dwa "konstruktory typu": `empty` oraz `node(Tree, Int, Tree)`. Funk-



Rysunek 4.7: Wykres czasu działania testu BinarySearchTree

cja dodająca element używa pattern matchingu, aby znaleźć odpowiednie miejsce w drzewie i tam dodaje nowy obiekt. Kod opisanych testów znajduje się odpowiednio w plikach `BinarySearchTreeTest.m`, `BinarySearchTreeClassicTest.swift` oraz `BinarySearchTreeEnumsTest.swift`.

4.6.2. Analiza działania

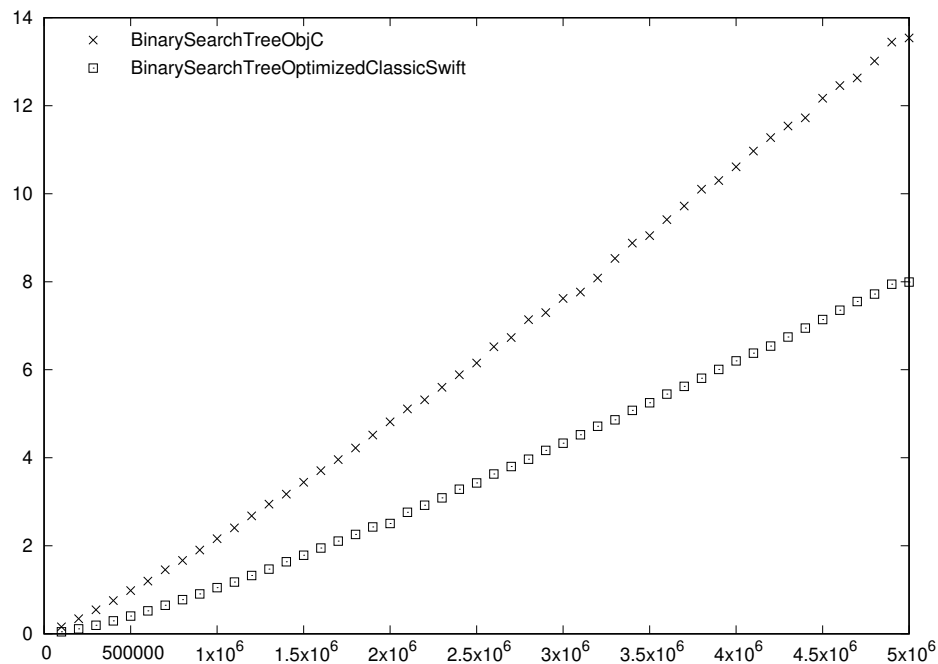
Wykres 4.7 Przedstawia wyniki działania testu tworzącego drzewo binarne o wielkości n . Jest to pierwszy test, dla którego implementacja w Objective-C jest szybsza od implementacji w Swift. Kod napisany w starszym z języków wykonuje się około 2 razy szybciej od implementacji napisanej Swift przy pomocy typów wyliczeniowych i ponad dwa razy szybciej od "klasycznej" implementacji w Swift.

Rysunek 4.8 przedstawia tabelę profilowania ww. testów dla wejściowego rozmiaru drzewa $n = 5000000$. Dla czytelności pominięte zostały wpisy, których czas wykonywania nie przekraczał 0.1% łącznego czasu wykonywania testu. Podczas tego pojedynczego uruchomienia kod napisany w Objective-C okazał się być aż 2,5 raza szybszy od implementacji w Swift przy użyciu typów wyliczeniowych oraz 3 razy szybszy od klasycznej implementacji w Swift. Głównym powodem takiego stanu rzeczy była wspomniana we wstępie do tego testu niemutowalność struktury drzewa dla implementacji w Swift.

Największą ilość czasu podczas wykonywania testów w Swift zajęło tworzenie nowych obiektów (kolor niebieski na tablicy profilowania) oraz obsługa ARC (kolor

15.58 s	100.0%	23.00 ms	▼-[BinarySearchTreeTestObjC run] Benchmarks
15.24 s	97.7%	27.00 ms	▼-[BinarySearchTreeObjC addElement:] Benchmarks
14.94 s	95.8%	594.00 ms	▼-[BinarySearchTreeObjC addElement:toTreeRootedInNode:] Benchmarks
6.89 s	44.2%	6.89 s	objc_retain libobjc.A.dylib
4.30 s	27.6%	4.30 s	objc_release libobjc.A.dylib
1.91 s	12.2%	1.91 s	objc_msgSend libobjc.A.dylib
445.00 ms	2.8%	10.00 ms	▶+[NSObject new] libobjc.A.dylib
195.00 ms	1.2%	0 s	▶<Unknown Address>
182.00 ms	1.1%	182.00 ms	objc_retainAutoreleasedReturnValue libobjc.A.dylib
159.00 ms	1.0%	159.00 ms	-[Node element] Benchmarks
88.00 ms	0.5%	88.00 ms	-[Node left] Benchmarks
87.00 ms	0.5%	87.00 ms	DYLD-STUB\$\$objc_retainAutoreleasedReturnValue Benchmarks
44.00 ms	0.2%	9.00 ms	▶objc_storeStrong libobjc.A.dylib
90.00 ms	0.5%	90.00 ms	objc_retain libobjc.A.dylib
88.00 ms	0.5%	88.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
72.00 ms	0.4%	72.00 ms	objc_msgSend libobjc.A.dylib
197.00 ms	1.2%	10.00 ms	▶+[NSArray(generate) generateArrayOfSize:] Benchmarks
41.00 ms	0.2%	41.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
34.00 ms	0.2%	8.00 ms	▶-[NSCFNumber longValue] CoreFoundation
31.00 ms	0.1%	31.00 ms	objc_msgSend libobjc.A.dylib
47.08 s	100.0%	0 s	▼@objc BinarySearchTreeClassicTestSwift.run() Benchmarks
46.91 s	99.6%	0 s	▼static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
46.84 s	99.4%	2.00 ms	▼specialized static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
25.74 s	54.6%	0 s	▼think for @callee_guaranteed (@owned Tree, @unowned Int) -> (@owned Tree, @error @owned Error) Benchmarks
25.74 s	54.6%	1.00 ms	▼closure #1 in static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
25.73 s	54.6%	764.00 ms	▼Tree.add(element:) Benchmarks
12.18 s	25.8%	12.18 s	_swift_retain_ Benchmarks
11.62 s	24.6%	27.00 ms	▶Tree.__allocating_init(left:value:right:) Benchmarks
1.00 s	2.1%	1.00 s	_swift_release_ Benchmarks
68.00 ms	0.1%	68.00 ms	swift_rt_swift_allocObject Benchmarks
50.00 ms	0.1%	50.00 ms	swift_rt_swift_release Benchmarks
48.00 ms	0.1%	48.00 ms	swift_rt_swift_retain Benchmarks
21.01 s	44.6%	4.00 ms	▶_swift_release_dealloc Benchmarks
58.00 ms	0.1%	58.00 ms	_swift_release_n_ Benchmarks
164.00 ms	0.3%	6.00 ms	▶static Array<A>.generate(size:) Benchmarks
39.55 s	100.0%	0 s	▼@objc BinarySearchTreeEnumsTestSwift.run() Benchmarks
39.39 s	99.5%	0 s	▼static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
39.34 s	99.4%	0 s	▼specialized static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
25.03 s	63.2%	0 s	▼think for @callee_guaranteed (@owned Tree, @unowned Int) -> (@owned Tree, @error @owned Error) Benchmarks
25.03 s	63.2%	2.00 ms	▼closure #1 in static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
25.00 s	63.1%	854.00 ms	▼Tree.add(element:) Benchmarks
10.77 s	27.2%	348.00 ms	▶_swift_allocObject_ Benchmarks
8.98 s	22.7%	8.98 s	_swift_retain_ Benchmarks
2.68 s	6.7%	2.68 s	_swift_release_ Benchmarks
1.43 s	3.6%	1.43 s	_swift_retain_n_ Benchmarks
102.00 ms	0.2%	102.00 ms	swift_rt_swift_retain Benchmarks
90.00 ms	0.2%	90.00 ms	swift_rt_swift_release Benchmarks
40.00 ms	0.1%	40.00 ms	swift_rt_swift_allocObject Benchmarks
14.23 s	35.9%	10.00 ms	▶_swift_release_dealloc Benchmarks
45.00 ms	0.1%	45.00 ms	_swift_release_n_ Benchmarks

Rysunek 4.8: Tablica profilowania dla testu BinarySearchTree (u góry - Objective-C, po środku - Swift przy użyciu klas, na dole - Swift przy użyciu typów wyliczeniowych)



Rysunek 4.9: Wykres czasu zoptymalizowanej wersji w Swift dla `BinarySearchTree` w porównaniu z wersją w Objective-C

czerwony). Powodem, dla którego tak się działo jest wielokrotne tworzenie obiektów dla tych samych węzłów, co powodowało bardzo częste wywoływania inicjalizatora i deinicjalizatora oraz w późniejszym etapie funkcji odpowiadających za inkrementację i dekrementację licznika referencji. Dla implementacji w Swift z użyciem typów wyliczeniowych łączny czas wywołań inicjalizatorów i deinicjalizatorów wyniósł 25,04s, a operacje obsługi liczników referencji zajęły łącznie 13,33s. Dla kodu napisanego za pomocą klas w Swift wartości te wynosiły odpowiednio 32,63s dla inicjalizacji i deinicjalizacji oraz 12,41s dla obsługi ARC. W Objective-C czas tworzenia nowych obiektów wynosił zaledwie 445ms. Obsługa ARC zajęła łącznie ok 11,64s. Dodatkowo do czasu działania kodu Objective-C należy dodać standardowo czas przesyłania metod za pomocą funkcji `objc_msgSend`, który wyniósł 2,01s.

Z powyższej analizy wynika, że choć w Swift można napisać bardzo bezpieczny kod, to ma to jednak swoją cenę w postaci mocno obniżonej wydajności. Analiza nie byłaby jednak pełna, jeśli nie zostałaby przeprowadzona próba napisania kodu działającego identycznie jak kod Objective-C, tj. modyfikująca aktualne węzły w drzewie.

Wykres 4.9 przedstawia czas działania zoptymalizowanego testu napisanego w języku Swift. Jak widać, ostatnia implementacja jest prawie 2-krotnie szybsza od implementacji w Objective-C. Tablica profilowania 4.10 tego testu wskazuje wyraźnie na przyczynę poprawy wydajności. W zoptymalizowanej implementacji pozbyto się tworzenia dużej ilości nowych obiektów podczas dodawania nowego elementu. Wywołania inicjalizatora zajmują teraz jedynie 611ms, co oznacza co ozna-

8.75 s	100.0%	0 s	▼@objc BinarySearchTreeOptimizedClassicTestSwift.run() Benchmarks
8.56 s	97.8%	0 s	▼static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
8.55 s	97.7%	0 s	▼specialized static Tree.buildTree(elements:) Benchmarks
8.44 s	96.5%	5.00 ms	▼think for @callee_guaranteed (@unowned Int) -> (@error @owned Error) Benchmarks
8.38 s	95.8%	445.00 ms	▼Tree.add(element:) Benchmarks
6.12 s	69.9%	6.12 s	_swift_retain_ Benchmarks
1.09 s	12.4%	1.09 s	_swift_release_ Benchmarks
611.00 ms	6.9%	2.00 ms	▼Tree._allocating_init(left:value:right:) Benchmarks
431.00 ms	4.9%	84.00 ms	►_swift_allocObject_ Benchmarks
175.00 ms	2.0%	175.00 ms	Tree.init(left:value:right:) Benchmarks
52.00 ms	0.5%	52.00 ms	swift_rt_swift_release Benchmarks
50.00 ms	0.5%	50.00 ms	swift_rt_swift_retain Benchmarks
52.00 ms	0.5%	52.00 ms	_swift_release_ Benchmarks
56.00 ms	0.6%	56.00 ms	_swift_retain_ Benchmarks
45.00 ms	0.5%	45.00 ms	_swift_release_ Benchmarks
9.00 ms	0.1%	0 s	▼specialized protocol witness for Collection.formIndex(after:) in conformance [A] Benchmarks
9.00 ms	0.1%	9.00 ms	specialized Array.formIndex(after:) Benchmarks
178.00 ms	2.0%	11.00 ms	►static Array<A>.generate(size:) Benchmarks

Rysunek 4.10: Tablica profilowania dla zoptymalizowanej wersji testu BinarySearchTree

cza skrócenie czasu potrzebnego na inicjalizację obiektów o 98% (wcześniej - 32,63s). Czas obsługi ARC również uległ zmniejszeniu - z 11,64s do 7,47s (spadek o 35%).

4.6.3. Podsumowanie

Pomimo początkowych problemów z wydajnością również i w tym teście kod napisany w Swift okazał się szybszy. Należy jednak uważać, z jakich właściwości języka się korzysta. Wykorzystanie niemutowalności obiektów czy zaawansowanych typów wyliczeniowych może pomóc w pisaniu bezpieczniejszego i bardziej czytelnego kodu, jednak źle wpływa na jego wydajność. Najszybsza wersja kodu w Swift okazała się szybsza od wersji w Objective-C głównie przez szybszą obsługę automatycznego zliczania referencji (spadek o 35%).

4.7. Rodzaje wywołania metod

4.7.1. Omówienie

Test opisany w tym rozdziale polega na wykonaniu bardzo prostej funkcji mnożącej liczbę całkowitą przez 2 na kilka sposobów:

- jako metoda struktury - metoda struktury zostanie wywołana statycznie. Kod tego eksperymentu znajduje się w teście `StaticDispatchTest.swift`.
- jako metoda struktury implementującej protokół - ze względu na fakt, że struktura jest schowana za protokołem i kompilator nie ma sposobu na zidentyfiko-

wanie dokładnego typu obiektu, metoda zostanie wywołana dynamicznie. Kod dla tego eksperymentu znajduje się w teście `DynamicDispatchTest.swift`.

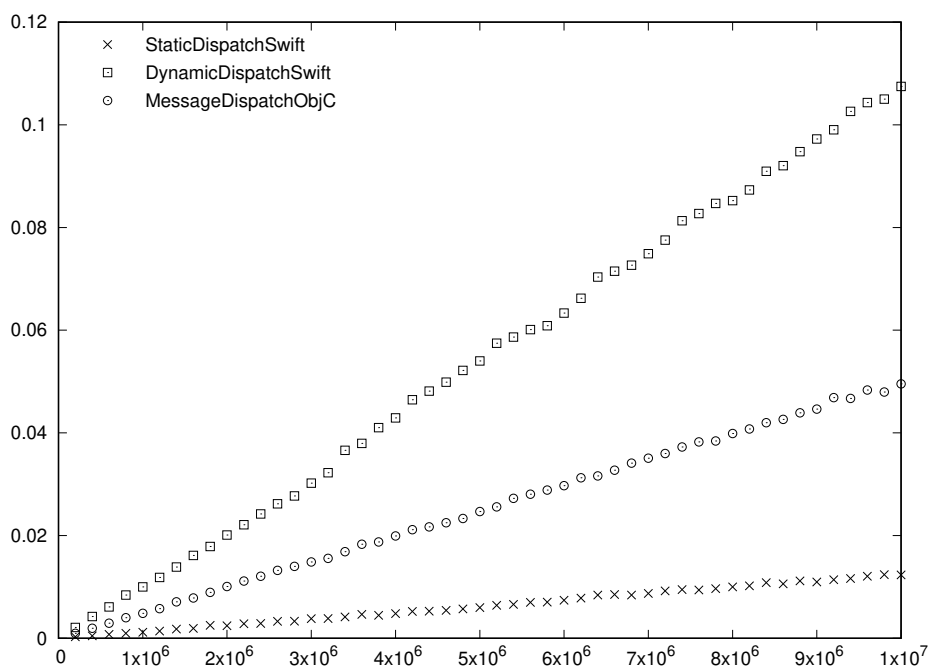
- jako metoda klasy z Objective-C - funkcje napisane w Objective-C są wywoływane przez wysłanie wiadomości. Kod dla tego testu znajduje się w pliku `MessageDispatchTest.m`.

Więcej informacji o sposobach na wywołanie metody w Swift i Objective-C znajduje się w sekcji 4.7..

Głównym celem tego testu jest sprawdzenie, czy nowe sposoby wywoływania metod wprowadzone w Swift są szybsze niż wywoływanie przez wysyłanie wiadomości z Objective-C.

4.7.2. Analiza działania

Wyniki wyżej opisanych testów znajdują się na wykresie 4.11.



Rysunek 4.11: Wykres czasu działania trzech metod wywołania funkcji: statycznej, dynamicznej i przez wiadomości

Jak widać na wykresie, czasy działania różnych metod wywołania różnią się od siebie znacznie. Zgodnie z przewidywaniami z opisu tego testu, statyczna metoda wywołania funkcji jest najszybsza. Na drugim miejscu znalazł się mechanizm wywoływania przez wiadomości, który jest ok. 4-krotnie wolniejszy od wywoływania statycznego. Wywołanie dynamiczne okazało się natomiast niespodziewanie wolne, zajęło ponad 2 razy więcej czasu niż wywołanie przez wiadomości i prawie 9 razy więcej

od wywołania statycznego. Tablica profilowania z rysunku 4.12 wskazuje na pewne powody takiego stanu.

Tablica profilowania przedstawiona na rysunku 4.12 przedstawia czas działania testów dla różnych metod wywołania i parametru wejściowego $n = 20000000$. Na jej podstawie można wysnuć kilka wniosków odnośnie czasu działania testów.

Po pierwsze, na czas działania testu dla wywołania statycznego składa się jedynie obsługa pętli `forEach` (kolor żółty na tablicy profilowania) oraz wywołanie funkcji `multiply`. To właśnie brak dodatkowych kosztownych operacji powoduje, że wywołanie statyczne jest najszybszym z trzech porównywanych mechanizmów.

Przy wywołaniu dynamicznym, implementacja funkcji `multiply` jest schowana za protokołem. Z tego powodu, adres funkcji, którą należy wywołać zostanie powiązany z wywołaniem dopiero w trakcie działania programu. Operacja ta zostanie wykonana w dwóch krokach:

- w trakcie kompilacji kompilator utworzy tablicę wirtualną (ang. *Protocol witness table*) dla protokołu `MultiplyByTwoProtocol` oraz struktury `MultiplyByTwoStruct`. Tablica ta zawiera adresy funkcji dla typu implementującego dany protokół. W tym przykładzie znajdzie się tam adres implementacji dla funkcji `multiply` w strukturze `MultiplybyTwoStruct`.
- następnie, w trakcie działania programu środowisko uruchomieniowe powiąże utworzoną tablicę z danym obiektem struktury tworząc tymczasowy kontener (ang. *existential container*). Taki kontener zostanie dopiero przekazany jako argument wywołania funkcji.

Z tablicy profilowania wynika, że tworzenie i usuwanie egzystencjalnego kontenera oraz kopiowanie danych struktury zawierającej się w kontenerze zajmuje $186ms$, czyli aż 76% całego czasu wykonania funkcji (kolor czerwony na tablicy profilowania). Pozostały czas ($56ms$) zajmuje wywołanie funkcji `multiply` oraz obsługa pętli `for...in`.

Wywołanie przez wiadomości okazało się szybsze niż wywołanie dynamiczne. Zawdzięcza to głównie świetnej optymalizacji oraz użyciu cache do przechowywania informacji o tym, jak obsłużyć ostatnio wysłane wiadomości. Jako, że wysyłana jest cały czas taka sama wiadomość do tej samej klasy, to cache jest tutaj bardzo wydajną formą optymalizacji. Nadal jednak narzut czasowy powodowany przez wywołania funkcji `objc_msgSend` to $22ms$, czyli około 40% czasu wykonywania całej metody.

4.7.3. Podsumowanie

Powyższy test potwierdza tezę, że wywołanie statyczne jest najszybszym sposobem wywoływania metod. Z kolei fakt, że wywołanie przez wysyłanie wiadomo-

32.00 ms	100.0%	0 s	▼@objc StaticDispatchSwift.run() Benchmarks
20.00 ms	62.5%	0 s	▼think for @callee_guaranteed (@unowned MultiplyByTwoStruct) -> (@error @owned Error) Benchmarks
20.00 ms	62.5%	0 s	▼closure #1 in StaticDispatchSwift.run() Benchmarks
20.00 ms	62.5%	20.00 ms	MultiplyByTwoStruct.multiply() Benchmarks
7.00 ms	21.8%	0 s	▼specialized protocol witness for Collection.subscript.getter in conformance [A] Benchmarks
7.00 ms	21.8%	0 s	▼specialized Array.subscript.getter Benchmarks
7.00 ms	21.8%	7.00 ms	specialized Array._getElement(_:wasNativeTypeChecked:matchingSubscriptCheck:) Benchmarks
4.00 ms	12.5%	4.00 ms	protocol witness for static Equatable.== infix(:) in conformance Int Benchmarks
1.00 ms	3.1%	0 s	▼specialized protocol witness for Collection.formIndex(after:) in conformance [A] Benchmarks
1.00 ms	3.1%	1.00 ms	specialized Array.formIndex(after:) Benchmarks
242.00 ms	100.0%	0 s	▼@objc DynamicDispatchSwift.run() Benchmarks
66.00 ms	27.2%	56.00 ms	▼outlined init with copy of MultiplyByTwoProtocol Benchmarks
10.00 ms	4.1%	10.00 ms	swift::metadataimpl::BufferValueWitnesses<swift::metadataimpl::ValueWitnesses<swift::metadataimpl::NativeB...
63.00 ms	26.0%	28.00 ms	▼DynamicDispatchSwift.run() Benchmarks
29.00 ms	11.9%	15.00 ms	▼closure #1 in DynamicDispatchSwift.run() Benchmarks
13.00 ms	5.3%	13.00 ms	protocol witness for MultiplyByTwoProtocol.multiply() in conformance MultiplyByTwoStruct Benchmarks
1.00 ms	0.4%	1.00 ms	__swift_project_boxed_opaque_existential_1 Benchmarks
4.00 ms	1.6%	4.00 ms	swift::metadataimpl::ValueWitnesses<swift::metadataimpl::NativeBox<unsigned long long, 8ul, 8ul, 8ul> >::dest
1.00 ms	0.4%	1.00 ms	outlined init with take of MultiplyByTwoProtocol Benchmarks
1.00 ms	0.4%	1.00 ms	outlined init with copy of MultiplyByTwoProtocol Benchmarks
39.00 ms	16.1%	39.00 ms	__swift_project_boxed_opaque_existential_1 Benchmarks
38.00 ms	15.7%	24.00 ms	▼outlined init with take of MultiplyByTwoProtocol Benchmarks
14.00 ms	5.7%	14.00 ms	swift::metadataimpl::BufferValueWitnesses<swift::metadataimpl::ValueWitnesses<swift::metadataimpl::NativeB...
34.00 ms	14.0%	34.00 ms	__swift_destroy_boxed_opaque_existential_1 Benchmarks
2.00 ms	0.8%	0 s	▼<Unknown Address>
2.00 ms	0.8%	2.00 ms	swift::metadataimpl::BufferValueWitnesses<swift::metadataimpl::ValueWitnesses<swift::metadataimpl::NativeB...
54.00 ms	100.0%	12.00 ms	▼-[MessageDispatchTestObjC run] Benchmarks
22.00 ms	40.7%	22.00 ms	objc_msgSend libobjc.A.dylib
20.00 ms	37.0%	5.00 ms	▼-[MultiplyByTwo multiply] Benchmarks
15.00 ms	27.7%	15.00 ms	-[MultiplyByTwo n] Benchmarks

Rysunek 4.12: Tablica profilowania dla testów mechanizmów wywołania funkcji: statycznego (u góry), dynamicznego (w środku) i przez wiadomości (na dole)

ści okazało się szybsze od wywołania dynamicznego jest już małym zaskoczeniem. Prawdopodobnie jest to spowodowane specyfiką testu - w trakcie działania programu wywoływana była ciągle tylko jedna funkcja, co pomogło środowisku uruchomieniowemu Objective-C w optymalizacji wysyłania wiadomości przy użyciu cache.

Przyczyną słabej wydajności wywołania dynamicznego jest wyszukiwanie adresów wywoływanych funkcji w trakcie działania programu. O ile przy małej ilości wywołań jest to wartość pomijalna, o tyle w pracy nad dużymi systemami informatycznymi powinna zostać wzięta pod uwagę.

4.8. Złożony algorytm

4.8.1. Omówienie

Wszystkie testy przedstawione w tej pracy skupiały się na przetestowaniu wydajności konkretnych aspektów języka Swift. Ostatni test sprawdza natomiast, jak język Swift sprawdza się w bardziej złożonych zadaniach, takich jak np. algorytm Dijkstry.

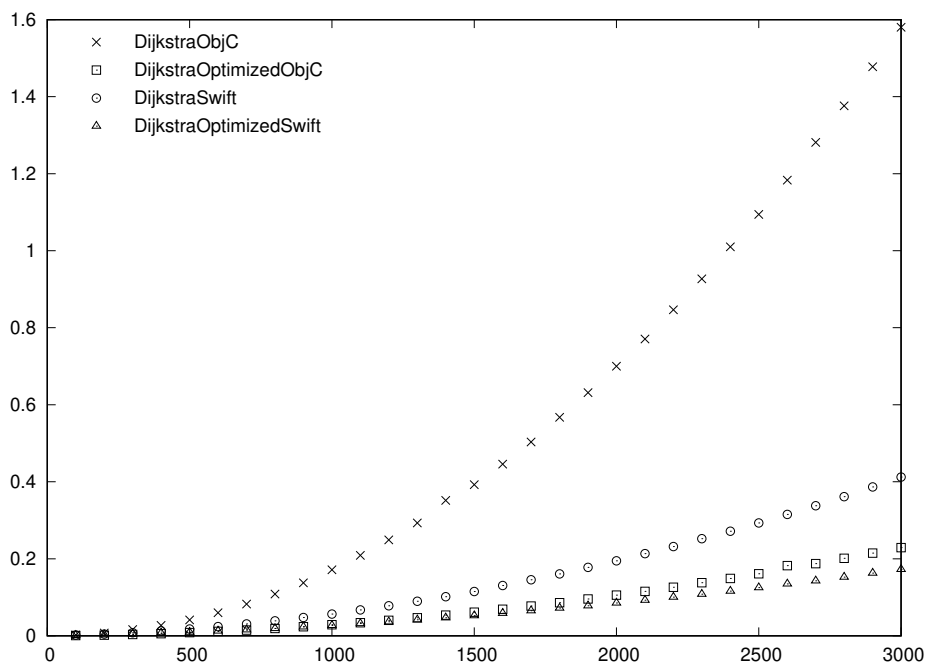
Algorytm Dijkstry to metoda znajdowania najkrótszych ścieżek w grafie. Niech dany będzie graf G o wierzchołkach V , macierzy sąsiedztwa w oraz pojedynczym źródle s . Pseudokod dla tego algorytmu wygląda następująco:

```

proc dijkstra( $V, w, s$ )
     $S = \emptyset$                                 zbiór wierzchołków z obliczoną najkrótszą ścieżką
     $Q = V$                                     kolejka priorytetowa
     $s.d = 0$ 
    for  $v \in Q$  do
         $v.d = +\infty$ 
    end
    while  $Q \neq \emptyset$ 
         $v = Q.removeMin()$ 
         $adj = v.adjacentVertices()$ 
        for  $u \in adj$  do
            if  $v.d + w[v][u] < u.d$ 
                then  $Q.decreaseKey(u, v.d + w[v][u])$ 
            fi
        end
    end
end

```

Ważną częścią algorytmu Dijkstry z punktu widzenia złożoności obliczeniowej jest sposób implementacji kolejki priorytetowej. Ze względu na dużą ilość operacji



Rysunek 4.13: Wykres czasu działania testów dla algorytmu Dijkstry

`removeMin` oraz `decreaseKey`, najwydajniejsze implementacje używają kopców Fibonacciego. Celem tego testu jest jednak porównanie czasu działania jak najbardziej podobnych do siebie implementacji w obu językach, a nie napisanie jak najwydajniejszej implementacji algorytmu, dlatego zdecydowano się użyć prostszej struktury danych, czyli zwykłych kopców typu `min`. Pozwoliło to na prostszą analizę czasu działania kodu bez zagłębiania się w szczegóły działania samej struktury.

Algorytm Dijkstry został zaimplementowany dwukrotnie dla każdego z języków. Pierwsze wersje (nazywane dalej *standardowymi*) korzystają ze wszystkich dostępnych funkcji danego języka. W przypadku Swift będą to funkcjonalności takie jak protokoły, funkcje wyższego rzędu `map` i `filter` czy funkcje pomocnicze. W wersji dla Objective-C użyto m.in. typów `NSArray` zarządzającego automatycznie długością tablicy, typu `NSNumber` pozwalającego na przechowywanie liczb w tablicy `NSArray` oraz automatycznego zarządzania pamięcią wszędzie tam, gdzie było to możliwe. Kod opisanych powyżej testów znajduje się w plikach `DijkstraTest.m` (dla Objective-C) oraz `DijkstraTest.swift` (dla Swift). Następnie przeprowadzono analizę działania wyżej opisanych implementacji i na podstawie jej wyników zoptymalizowano implementacje dla obu języków. Poprawiony kod znajduje się w plikach `DijkstraOptimized.m` oraz `DijkstraOptimized.swift`.

4.8.2. Analiza działania

Rezultaty poszczególnych testów zostały przedstawione na wykresie 4.13. W przypadku standardowej implementacji przewaga Swifta jest wyraźna, kod

napisany w tym języku jest 3-4 razy szybszy od kodu w Objective-C. W przypadku zoptymalizowanych wersji Swifta kod swiftowy nadal jest szybszy, jednak różnica nie jest już aż tak znacząca i wynosi ok. 30%.

Tablica profilowania została przedstawiona na rysunku 4.14. Test, którego wyniki przedstawione są na tablicy został uruchomiony dla grafu o 10000 wierzchołków. Dla lepszej czytelności usunięto wpisy zajmujące nie więcej niż 10ms. Krótka analiza tablicy wskazuje na przyczyny słabej wydajności kodu napisanego w Objective-C. Jak widać, cały test zajął ponad 20 sekund, z czego obliczanie sąsiednich wierzchołków zajęło aż 5,72s (około 27% czasu całego testu). Również około 5s również pobieranie danych z tablic typu `NSArray`. Następnie, wywołanie funkcji `objc_msgSend`, które łącznie zajęło 4,04s (ok. 19% całkowitego czasu). Ostatnim czasochłonnym elementem jest obsługa zliczania referencji. Łączny czas wywołania funkcji `objc_retain`, `objc_release` i ich pochodnych wyniósł łącznie 3,01s, czyli około 14% całkowitego czasu wywołania funkcji. Ciekawy jest znikomo mały czas obsługi kolejki priorytetowej (łącznie około 216ms).

W przypadku implementacji w języku Swift łączny czas testu wyniósł jedynie 4,45s. Największą część zajęła obsługa zliczania referencji - łącznie 2,69s, czyli ponad 60% całkowitego czasu. Obliczanie sąsiednich wierzchołków również okazało się stosunkowo kosztowne i potrzebowało 993ms (22% całkowitego czasu). Obsługa kolejki priorytetowej zajęła 207ms, a więc czas zbliżony do tego z implementacji w Objective-C.

Na podstawie powyższej analizy wyciągnięto wnioski odnośnie elementów implementacji, które należy ulepszyć i przyspieszyć. W przypadku kodu napisanego w Objective-C:

- zmniejszono ilość wywołań funkcji `objc_msgSend` poprzez:
 - włączenie kodu metody `adjacentNodesToNode:withMatrix:n:` do ciała metody `dijkstra`
 - użycie prymitywnego typu `NSUInteger` (alias na typ `unsigned long` z języka C) zamiast `NSNumber`.
 - użycie prymitywnych tablic z języka C i operacji wskaźnikowych zamiast typu `NSArray` i operatora indeksowania
 - zapamiętanie w zmiennej lokalnej wartości wielkości grafu `n`
- zmniejszono czas obsługi tablicy poprzez użycie typu tablicy znanego z języka C zamiast `NSArray`
- usunięto potrzebę zamiany typu `NSNumber` na typ całkowitoliczbowy poprzez użycie typu `NSUInteger`
- zredukowano czas potrzebny na obsługę liczników referencji poprzez zmniejszenie ilości tymczasowych obiektów (głównie tablic zawierających sąsiednie

20.80 s	100.0%	0 s	▼-[DijkstraTestObjC run] Benchmarks
18.52 s	89.0%	382.00 ms	▼-[DijkstraTestObjC dijkstra] Benchmarks
5.72 s	27.5%	391.00 ms	►-[DijkstraTestObjC adjacentNodesToNode:withMatrix:n:] Benchmarks
4.97 s	23.9%	4.97 s	-[_NSArrayM objectAtIndexedSubscript:] CoreFoundation
2.19 s	10.5%	177.00 ms	►-[__NSCFNumber unsignedLongValue] CoreFoundation
1.87 s	9.0%	1.87 s	objc_msgSend libobjc.A.dylib
1.56 s	7.4%	1.56 s	objc_retain libobjc.A.dylib
1.18 s	5.6%	1.18 s	objc_release libobjc.A.dylib
137.00 ms	0.6%	137.00 ms	objc_retainAutoreleasedReturnValue libobjc.A.dylib
70.00 ms	0.3%	70.00 ms	DYLD-STUB\$\$objc_retainAutoreleasedReturnValue Benchmarks
69.00 ms	0.3%	0 s	►-[PriorityQueueObjC removeMin] Benchmarks
68.00 ms	0.3%	0 s	►-[__NSArrayM dealloc] CoreFoundation
58.00 ms	0.2%	0 s	►<Unknown Address>
54.00 ms	0.2%	54.00 ms	-[__NSCFNumber unsignedIntegerValue] CoreFoundation
43.00 ms	0.2%	43.00 ms	-[GraphElement nodeIndex] Benchmarks
37.00 ms	0.1%	37.00 ms	-[GraphElement distance] Benchmarks
34.00 ms	0.1%	34.00 ms	-[GraphElement alreadyComputed] Benchmarks
22.00 ms	0.1%	22.00 ms	-[DijkstraTestObjC adjacencyMatrix] Benchmarks
21.00 ms	0.1%	21.00 ms	-[GraphElement queueIndex] Benchmarks
12.00 ms	0.0%	0 s	►-[PriorityQueueObjC moveToTop:] Benchmarks
2.17 s	10.4%	2.17 s	objc_msgSend libobjc.A.dylib
65.00 ms	0.3%	65.00 ms	DYLD-STUB\$\$objc_retainAutoreleasedReturnValue Benchmarks
45.00 ms	0.2%	0 s	►<Unknown Address>
4.45 s	100.0%	0 s	▼@objc DijkstraTestSwift.run() Benchmarks
2.60 s	58.4%	401.00 ms	▼DijkstraTestSwift.dijkstra() Benchmarks
993.00 ms	22.2%	0 s	►DijkstraTestSwift.adjacentNodes(to:from:) Benchmarks
722.00 ms	16.2%	0 s	►_swift_release_dealloc Benchmarks
182.00 ms	4.0%	0 s	►PriorityQueueSwift.removeMin() Benchmarks
93.00 ms	2.0%	93.00 ms	swift_retain Benchmarks
74.00 ms	1.6%	0 s	►specialized ContiguousArray._copyToNewBuffer(oldCount:) Benchmarks
53.00 ms	1.1%	53.00 ms	_swift_retain_(swift::HeapObject*) Benchmarks
28.00 ms	0.6%	28.00 ms	_swift_release_(swift::HeapObject*) Benchmarks
25.00 ms	0.5%	0 s	►PriorityQueueSwift.updateDecreasedElement(at:) Benchmarks
23.00 ms	0.5%	23.00 ms	swift_release Benchmarks
1.19 s	26.6%	1.19 s	_swift_retain_(swift::HeapObject*) Benchmarks
550.00 ms	12.3%	550.00 ms	_swift_release_(swift::HeapObject*) Benchmarks
47.00 ms	1.0%	47.00 ms	swift_isUniquelyReferenced_nonNull_native Benchmarks
32.00 ms	0.7%	32.00 ms	swift_retain Benchmarks
21.00 ms	0.4%	21.00 ms	swift_release Benchmarks
11.00 ms	0.2%	0 s	►<Unknown Address>
2.50 s	100.0%	0 s	▼-[DijkstraOptimizedTestObjC run] Benchmarks
1.97 s	78.9%	307.00 ms	▼-[DijkstraOptimizedTestObjC dijkstra] Benchmarks
700.00 ms	28.0%	700.00 ms	objc_retain libobjc.A.dylib
523.00 ms	20.9%	523.00 ms	objc_release libobjc.A.dylib
189.00 ms	7.5%	189.00 ms	-[_NSArrayM objectAtIndexedSubscript:] CoreFoundation
55.00 ms	2.2%	55.00 ms	objc_retainAutoreleasedReturnValue libobjc.A.dylib
51.00 ms	2.0%	0 s	►-[PriorityQueueObjC removeMin] Benchmarks
49.00 ms	1.9%	49.00 ms	-[GraphElement distance] Benchmarks
34.00 ms	1.3%	34.00 ms	-[GraphElement alreadyComputed] Benchmarks
26.00 ms	1.0%	26.00 ms	-[GraphElement nodeIndex] Benchmarks
21.00 ms	0.8%	21.00 ms	-[GraphElement queueIndex] Benchmarks
459.00 ms	18.3%	459.00 ms	objc_msgSend libobjc.A.dylib
41.00 ms	1.6%	0 s	►<Unknown Address>
24.00 ms	0.9%	24.00 ms	DYLD-STUB\$\$objc_retainAutoreleasedReturnValue Benchmarks
1.63 s	100.0%	0 s	▼@objc DijkstraOptimizedTestSwift.run() Benchmarks
722.00 ms	44.2%	424.00 ms	▼DijkstraOptimizedTestSwift.dijkstra() Benchmarks
156.00 ms	9.5%	0 s	►PriorityQueueSwift.removeMin() Benchmarks
36.00 ms	2.2%	0 s	►PriorityQueueSwift.updateDecreasedElement(at:) Benchmarks
25.00 ms	1.5%	25.00 ms	protocol witness for static Equatable.== infix(.,:) in conformance Int Benchmarks
21.00 ms	1.2%	21.00 ms	swift_release Benchmarks
17.00 ms	1.0%	17.00 ms	_swift_release_(swift::HeapObject*) Benchmarks
16.00 ms	0.9%	16.00 ms	swift_retain Benchmarks
461.00 ms	28.2%	461.00 ms	_swift_release_(swift::HeapObject*) Benchmarks
426.00 ms	26.1%	426.00 ms	_swift_retain_(swift::HeapObject*) Benchmarks
14.00 ms	0.8%	14.00 ms	swift_release Benchmarks

Rysunek 4.14: Tablica profilowania dla testów algorytmu Dijkstry, od góry: standardowy Objective-C, standardowy Swift, zoptymalizowany Objective-C, zoptymalizowany Swift

wierzchołki oraz tymczasowych referencji do liczb opakowanych w typ `NSNumber`)

W przypadku kodu w Swift optymalizacje skupiają się głównie na zmniejszeniu ilości czasu potrzebnego na obsługę licznika referencji:

- włączenie kodu metody `adjacentNodes(to:from:)` do ciała metody `dijkstra`
- użycie pętli `for` zamiast funkcji wyższych rzędów
- użycie wczesnego wychodzenia z pętli za pomocą słowa kluczowego `continue`

Wyniki testów po optymalizacjach są również przedstawione na wykresie 4.13 oraz tablicy profilowania 4.14. Czas wykonania obu testów zmalał, w przypadku implementacji w Swift o 63%, w przypadku Objective-C aż o 88%. Wydajność kodu w starszym języku znacznie zbliżyła się do wydajności kodu w Swift. Należy jednak zaznaczyć, że w kilku przypadkach użyto elementów języka C, który jest w pełni kompatybilny z Objective-C i jest jednym z najszybszych języków używanych współcześnie.

4.8.3. Podsumowanie

Powyższy test jest przykładem na to, że kod swiftowy jest wydajniejszy niż kod Objective-C również w przypadku złożonych problemów. Co więcej, kod napisany bez specjalnego myślenia o wydajności okazał się całkiem szybki.

Standardowe implementacje w obu językach potwierdziły wnioski z poprzednich testów. Typ `NSArray` w porównaniu z typem `Array` ze Swifta jest słabo wydajny. Kod Objective-C, który operuje na typach prostych powinien używać tablic z języka C. Jak w prawie każdym poprzednim teście, narzut funkcji `objc_msgSend` jest znaczący, a obsługa inkrementowania i dekrementowania liczników referencji zajmuje więcej czasu niż w Swift. Również użycie typu `NSNumber` opakującego typ całkowitoliczbowy pokazało, jak wolne jest to rozwiązanie.

Aby kod zapisany w Objective-C wykonywał się w krótkim czasie, autor testu musiał użyć kilku elementów języka C. Jest zatem możliwe pisanie wydajnego kodu w Objective-C przy użyciu C, traci się przy tym jednak większość zalet, jakie Objective-C daje (np. ARC, obiektowość).

4.9. Pozostałe testy

4.9.1. Zliczanie słów

Test polega na zliczeniu ilości wystąpień słów w tekście składającym się z n słów. Dla każdej instancji testu generowany jest nowy tekst zawierający słowa wylosowane z tablicy około 100 słów. Kod testów dostępny jest w plikach `WordFrequencyTest.swift` (dla języka Swift) oraz `WordFrequencyTest.m` (dla Objective-C).

4.9.2. Sito Eratostenesa

Test polega na obliczeniu wszystkich liczb pierwszych z przedziału $[2, n)$ przy pomocy metody sita Eratostenesa. Kod testów znajduje się w plikach `SieveOfErathostenesTest.swift` (dla języka Swift) oraz `SieveOfErathostenesTest.m` (dla języka Objective-C).

4.9.3. Zliczanie liter, słów i linii

Test polega na zliczaniu ilości liter, słów oraz linii w tekście długości n znaków. Na potrzeby tego testu przyjęto, że słowo to ciąg znaków zakończony spacją, tabulatorem lub znakiem nowej linii, a linia to ciąg znaków zakończony znakiem nowej linii. Kod testów został zapisany w plikach `CountLinesWordsCharsTest.swift` (dla języka Swift) oraz `CountLinesWordsCharsTest.m` (dla Objective-C).

4.9.4. Konkatenacja napisów

Test polega na n -krotnym skonkatenowaniu napisu *Hello world* ze sobą. Kod testów dostępny jest w plikach `StringConcatenationTest.swift` (dla języka Swift) oraz `StringConcatenationTest.m` (dla Objective-C).

4.9.5. Histogram RGB

Test polega na wygenerowaniu histogramu RGB dla ciągu pikseli o długości n . Każdy piksel zawiera trzy liczby z przedziału $[0, 255]$, opisujące wartość koloru czerwonego, zielonego i niebieskiego. Histogram to dwuwymiarowa tablica wielkości 3×256 . Element na pozycji (i, j) w histogramie opisuje ilość pikseli, które dla koloru i przyjmują wartość j . Kod testów znajduje się w plikach `RGBHistogramTest.swift` (dla języka Swift) oraz `RGBHistogramTest.m` (dla Objective-C).

4.9.6. Szyfr RC4

Test polega na zaszyfrowaniu wiadomości o długości n szyfrem RC4 z kluczem `SecretKey`. Szyfr RC4 to szyfr strumieniowy opracowany w 1987 roku przez Rona Rivesta. Dziś jest uważany za niedostatecznie bezpieczny, jednak przez wiele lat był używany w popularnych protokołach sieciowych, takich jak WEP czy SSL. Kod testów został zapisany w plikach `RC4Test.swift` (dla języka Swift) oraz `RC4Text.m` (dla Objective-C)

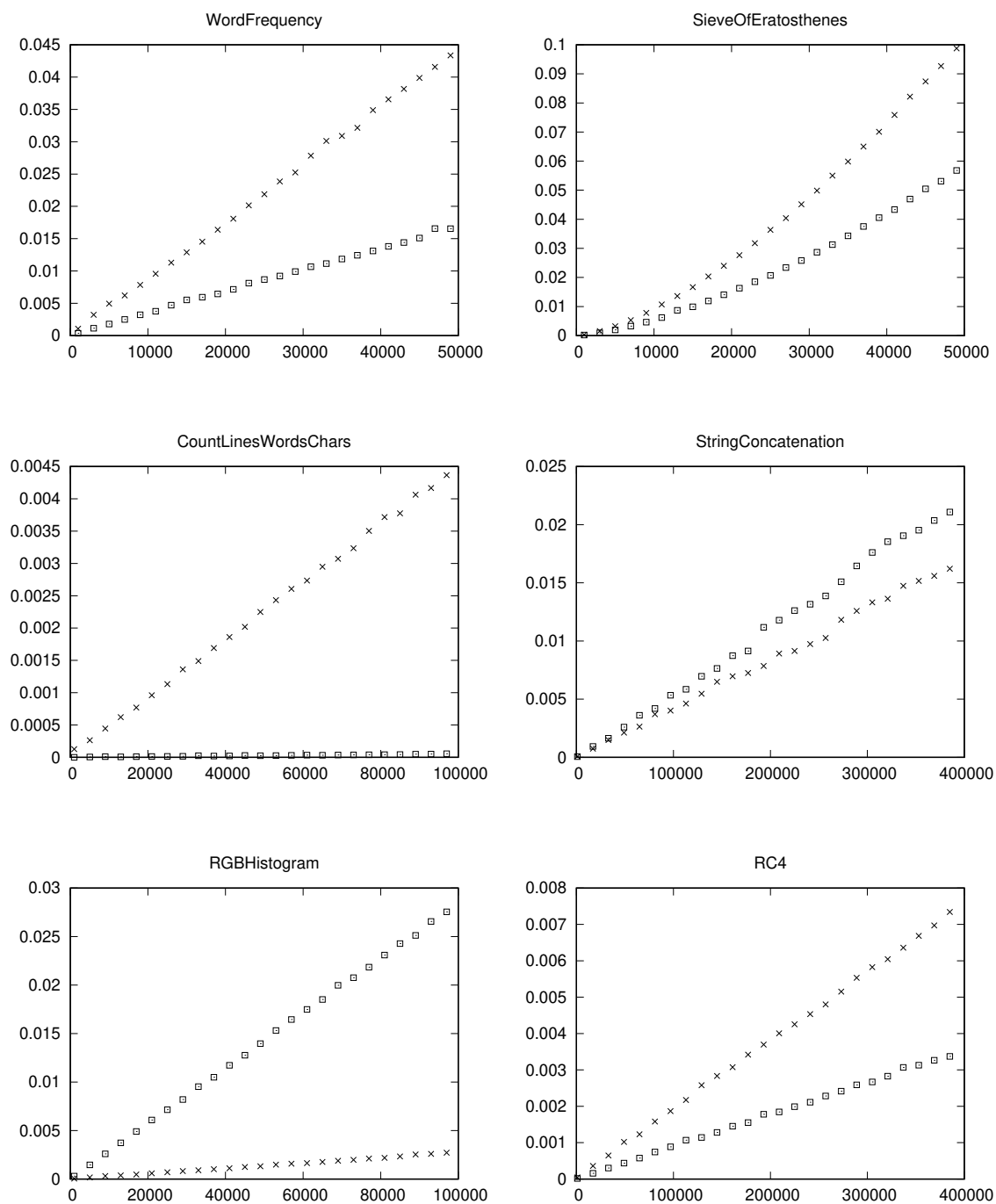
4.9.7. Wyniki pozostałych testów

Wyniki pozostałych testów zostały przedstawione na rysunku 4.15. W czterech testach kod Objective-C był znacząco szybszy. Trzy z nich (`WordFrequency`, `RC4` oraz `CountLinesWordsChars`) wykonywały bardzo dużo operacji na napisach, można zatem wysnuć tezę, że napisy kodowane domyślnie za pomocą standardu UTF-8 powodują duży narzut na wydajność ich przetwarzania, nawet jeśli sam napis zawiera jedynie znaki z tablicy ASCII.

W teście `SieveOfErathostenes` największym obciążeniem były operacje na tablicach. W przypadku implementacji w Objective-C użyto prostych tablic z języka C, stąd tak wysoka wydajność tej implementacji.

Swift okazał się szybszy w dwóch testach. Podobnie jak test `SieveOfEratosthenes`, test `RGBHistogram` również polegał na wykonywaniu dużej ilości operacji na tablicy. W tym wypadku do implementacji w Objective-C użyto klasy `NSArray`. Zatem wniosek, jaki nasuwa się na myśl jest następujący: jeśli kod Objective-C ma być szybki, należy użyć struktur danych z C.

Ostatni test `StringConcatenation` pokazał, że implementacja operacji dodawania napisów jest nieco szybsza w nowszym języku.



Rysunek 4.15: Wykresy czasu działania pozostałych testów (linia znaków 'x' - Swift, linia kwadratów - Objective-C)

Rozdział 5.

Wnioski

5.1. Podsumowanie wyników

L.p.	Test	Swift w porównaniu z Objective-C
1.	ArrayInsertion	-78,32 %
2.	Fibonacci	-45,84 %
3.	BubbleSort	-87,69 %
4a.	BinarySearchTree - Classic	+129,29 %
4b.	BinarySearchTree - Enums	+103,20 %
4c.	BinarySearchTree - Optimized	-72,09 %
5a.	DispatchMethod - Static vs Message	-75,00 %
5b.	DispatchMethod - Dynamic vs Message	+112,79 %
6a.	Dijkstra	-65,33 %
6b.	DijkstraOptimized	-5,14 %
7.	WordFrequency	+157,48 %
8.	SieveOfEratosthenes	+70,94 %
9.	CountLinesWordsChars	+7718,38 %
10.	StringConcatenation	-22,48 %
11.	RGBHistogram	-90,21 %
12.	RC4	+116,41 %

Tablica 5.1: Tabela względnych czasów testów kodu Swift do kodu Objective-C

Tabela 5.1 przedstawia różnicę, między czasem wykonania testu w Swift a Objective-C dla każdego testu opisanego w tej pracy. Wartość ujemna (oznaczona kolorem zielonym) oznacza, że kod Swift był średnio o x procent szybszy w danym teście. Analogicznie wartość dodatnia (oznaczona kolorem czerwonym) wskazuje, że kod Swift był średnio o x procent wolniejszy od kodu Objective-C.

Z dwunastu przeprowadzonych testów, kod pisany w języku Swift był szybszy

w ośmiu przypadkach. W dwóch z ośmiu przypadków wymagane były pewne optymalizacje kodu. W przypadku testu `BinarySearchTree` należało zrezygnować z typów wartościowych na rzecz klas. W teście `DispatchMethod`, dopiero statyczne wywoływanie funkcji okazało się szybsze od wywoływania przez wiadomości z Objective-C. Przykłady te pozwalają wysnuć wniosek, że choć Swift jest ogólnie szybszy od Objective-C, to należy ostrożnie używać bardziej zaawansowanych właściwości tego języka. W czterech testach szybszy był kod Objective-C.

5.2. Słabe i mocne strony Swifta na podstawie testów

Główne cechy Swifta, dzięki którym kod pisany w tym języku jest szybszy to:

- lepiej zoptymalizowane podstawowe struktury danych: `Array`, `Dictionary` oraz `Set` (w tym, możliwość przechowywania w nich prymitywnych typów danych)
- zrezygnowanie z wywoływania metod przez wiadomości (a co za tym idzie wyeliminowanie narzutu obliczeniowego związanego z działaniem funkcji `objc_msgSend`) i zastąpienie go w większości przypadków wywołaniami statycznymi
- zoptymalizowana obsługa ARC, np. poprzez stosowanie typów wartościowych
- ulepszona obsługa właściwości klas (ang. *properties*)

Aspekty, w których Swift przegrywa wydajnościowo z Objective-C:

- obsługa napisów (ang. *strings*)
- język C jest nadal szybszy od Swifta, zatem dobrze zoptymalizowany kod w Objective-C (tj. w którym najważniejsze fragmenty są napisane w C), może okazać się szybszy od kodu swiftowego

5.3. Perspektywy na przyszłość

Swift jest językiem stawiającym na bezpieczeństwo, wygodę pracy oraz po części również na szybkość działania. Otwarte źródła języka, dynamiczny rozwój oraz zaangażowana społeczność sprawiają, że ma on szansę podbić nie tylko świat aplikacji na systemy Apple, ale również inne gałęzie branży informatycznej. Aby to jednak miało miejsce, Swift musi poprawić kilka aspektów, w których wyraźnie odstaje od konkurencyjnych języków.

Największym problemem Swifta jest jego młody wiek. Pomimo, że od czasu wydania wersji 1.0 języka minęło już prawie 5 lat, to nadal nie ma stabilnego Interfejsu

binarnego aplikacji (ABI), a co za tym idzie, programiści nie mogą używać bibliotek napisanych w innych wersjach języka niż wersja, w której piszą projekt. Do wersji 3.2 Swift nie miał też kompatybilności wstecznej, przez co przejście na nowszą wersję języka wiązało się z koniecznością konwersji całego kodu (łącznie z bibliotekami zewnętrznymi), co nie zawsze należało do najłatwiejszych zadań.

Przez pierwsze półtora roku Swift był językiem pozwalającym na tworzenie aplikacji tylko i wyłącznie na platformy iOS i MacOS. Z tego powodu, wszystkie biblioteki w tamtym czasie skupiały się na potrzebach tych dwóch platform. 3 grudnia 2015 roku ogłoszono, że Swift może zostać uruchomiony na systemach rodziny Linux. Okazało się jednak, że poza samym językiem i jego biblioteką standardową nie ma zbyt wielu narzędzi, gdyż albo nie zostały przystosowane do uruchamiania pod systemem innym niż MacOS, albo do tej pory nie było potrzeby, żeby stworzyć takie narzędzia. Społeczność zaczęła wtedy portować istniejące programy i tworzyć nowe, nadal jednak brakuje wielu stabilnych, multiplatformowych bibliotek. Przykładem może być brak multiplatformowej biblioteki do tworzenia interfejsów graficznych, takiej jak Swing czy QT czy zaawansowanego frameworka do tworzenia aplikacji internetowych. Nie istnieje też zintegrowane środowisko programistyczne do pracy w Swift pod systemem Linux.

Testy opisane w tej pracy udowodniły, że automatyczne zliczanie referencji powoduje w niektórych przypadkach duży narzut obliczeniowy. Jeśli język Swift ma się stać językiem do pisania rozbudowanych, wysokowydajnościowych systemów, problem ten musi zostać zaadresowany. Jedną z propozycji na rozwiązanie tego problemu jest implementacja koncepcji własności (ang. *ownership*) pamięci ¹, zastosowana ostatnio w języku Rust.

Generyczność w Swift również pozostawia pole do poprawy. W 2016 roku na powstał dokument ², w którym wymienione zostały poprawki, które ulepszyłyby pracę z typami generycznymi, funkcjami generycznymi i protokołami. Znalazły się tam m.in. takie zagadnienia jak:

- *variadic generics*, czyli funkcja znana z języka C++ (tam zastosowana dla szablonów, nie typów generycznych, zasada działania pozostaje jednak taka sama)
- rozszerzenia typów strukturalnych (czyli w wypadku Swift - krotek)
- generyczne protokoły, podobne do generycznych interfejsów w C# czy Java

Refleksje i wsparcie dla metaprogramingu to kolejne przydatne funkcje, których brakuje w Swift. Co prawda istnieje typ `Mirror` pozwalający na przeglądanie struktury typu (typów zagnieżdżonych, funkcji, właściwości i ich wartości), niemniej

¹<https://github.com/apple/swift/blob/master/docs/OwnershipManifesto.md>

²<https://github.com/apple/swift/blob/master/docs/GenericsManifesto.md>

w porównaniu z refleksjami z C#, Java, nie wspominając już o językach skryptowych takich jak JavaScript, funkcja ta jest mocno ograniczona. Przykładowo, za pomocą mirroringu nie można ustawić wartości właściwości. Brak pełnych refleksji jest sporym utrudnieniem w pisaniu narzędzi automatyzujących pracę, np. generatorów kodu czy linterów.

Twórcy Swifta powinni również poprawić wsparcie dla obliczeń asynchronicznych. W tym momencie, Swift nie posiada żadnego wbudowanego mechanizmu wykonywania kodu asynchronicznego. Programiści zwykle wykorzystują do tego multiplatformową technologię Grand Central Dispatch, opakowującą wątki systemowe w abstrakcję w postaci kolejek operacji. Już w 2016 roku Chris Lattner wspominał o możliwości zaimplementowania w Swift mechanizmu `async/await`, znanego z C# czy JavaScript lub modelu aktorów, na razie jednak nie pojawiły się żadne informacje o postępach w tym kierunku.

Ostatnim dużym problemem Swifta jest słaba współpraca z innymi językami programowania. Język Java dzięki platformie JVM może używać kodu napisanego w takich językach jak Kotlin, Clojure, Groovy czy Scala. C# współpracuje np. z C, C++, F#, Visual Basic .NET. Istnieją również implementacje popularnych języków skryptowych takich jak Python czy Ruby pozwalające na kompilowanie ich kodu do kodu pośredniego JVM lub CIL. Swift w wersji 4.0 współpracuje w zasadzie tylko z Objective-C oraz C (jako, że C jest podzbiorem Objective-C). Istnieje również możliwość używania kodu napisanego w C++, wiąże się to jednak z napisaniem biblioteki opakowującej kod C (ang. *wrapper*) w Objective-C.

Rozdział 6.

Podsumowanie i dalsze kierunki

Głównym celem tej pracy było porównanie wydajności języka Swift z jego poprzednikiem, Objective-C. Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że w większości przypadków Swift jest bardziej wydajnym językiem. Wyniki przedstawione we wpisie z blogu [1] oraz pracy [2], choć mocno okrojone, potwierdzają rezultaty otrzymane w tej pracy. Wyniki z wpisu [3] sugerują podobną wydajność, badania zostały jednak przeprowadzone w 2015 roku, czyli przy użyciu Swifta w wersji nie wyższej niż 2.0, który od tamtej pory został mocno zoptymalizowany.

Najważniejsze powody lepszej wydajności Swift to zastosowanie wywoływania statycznego i dynamicznego metod zamiast wywoływania przez wiadomości, zoptymalizowane struktury danych i obsługa ARC oraz lepsze wsparcie dla programowania obiektowego. Na korzyść Objective-C przemawia szybsza implementacja ciągów znakowych oraz stuprocentowa kompatybilność z C. Nie istnieją prace, które porównywałyby te dwa języki w równie szczegółowy sposób co niniejsza praca, z tego też względu nie ma możliwości skonfrontowania opisanych w tym akapicie wniosków.

Nowy język naprawia wiele problemów wydajnościowych, z którymi borykało się Objective-C, co w połączeniu z nowymi funkcjami Swifta przyspieszającymi tworzenie bezpieczniejszego i łatwiejszego w utrzymaniu oprogramowania sprawia, że jest dużo lepszym wyborem dla aplikacji mobilnych i desktopowych (a w przyszłości być może również serwerowych).

Swift jest językiem podlegającym ciągłemu i szybkiemu rozwojowi. Z tego powodu, powyższa praca nie jest definitywnie zakończona i w przyszłości może być rozszerzana o kolejne przypadki testowe sprawdzające nowe funkcje języka czy zmiany w optymalizacji kompilatora lub środowiska uruchomieniowego.

Bibliografia

- [1] "Is Swift Faster Than Objective-C?", <https://yalantis.com/blog/is-swift-faster-than-objective-c/>
- [2] <http://www.ijeast.com/papers/185-189,Tesma110,IJEAST.pdf>
- [3] <https://thomasguenzel.com/blog/2015/12/01/a-small-speed-comparison-objective-c-and-swift/>