ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к курсовому проекту по дисциплине

«Структуры и алгоритмы обработки данных»

на тему

ФИЛЬТР БЛУМА

|  |  |
| --- | --- |
| Выполнил студент | Григорьев Юрий Вадимович |
|  | Ф.И.О. |

|  |  |
| --- | --- |
| Группы | ИС-142 |
|  |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Работу принял |  | ст. преп. Кафедры ВС Д. М. Берлизов |
|  | подпись |  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Защищена |  | Оценка |  |
|  |  |  |  |

Новосибирск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 3](#__RefHeading___Toc4327_3153689509)

[1 Структура фильтра Блума 3](#__RefHeading___Toc4329_3153689509)

[1.1 Составные компоненты 3](#__RefHeading___Toc4331_3153689509)

[1.2 Алгоритм работы 4](#__RefHeading___Toc4333_3153689509)

[1.3 Оптимальные значения параметров фильтра Блума 5](#__RefHeading___Toc4335_3153689509)

1.4 Выводы……………………………………………………………………………7

[2 Экспериментальное исследование эффективности структуры данных 8](#__RefHeading___Toc4337_3153689509)

[2.1 Организация моделирования 8](#__RefHeading___Toc4339_3153689509)

[2.2 Результаты моделирования 9](#__RefHeading___Toc4341_3153689509)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 13](#__RefHeading___Toc4343_3153689509)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 14](#__RefHeading___Toc4345_3153689509)

[ПРИЛОЖЕНИЕ 15](#__RefHeading___Toc4347_3153689509)

[1 Исходный код программы 15](#__RefHeading___Toc4349_3153689509)

1.1 Файл "main.c"……………………………………………………………………15

1.2 Файл "bits.c"……………………………………………………………………..20

1.3 Файл "bits.h"……………………………………………………………………..20

1.4 Файл "bloom.c"…………………………………………………………………..21

1.5 Файл "bloom.h"……………………………………………………………….…22

ВВЕДЕНИЕ

Работа с большим массивом данных требует больших вычислительных мощностей. Для того, чтобы отыскать какой-то объект в массиве/словаре/списке (например, по строковому ключу) сервер может затратить много драгоценного времени и электроэнергии. В случае, когда требуется проверить лишь отсутствие элемента в структуре данных (таблице/массиве/дереве), поиск целого элемента (со всеми его полями и свойствами) становится и вовсе бессмысленным. Чтобы сократить время обращений к «пустым» записям и освободить много драгоценного места в памяти, хоть и ценой вероятности ложноположительного результата «поиска», Бертон Говард Блум придумал собственную структуру данных, назвав его фильтром Блума, по своей же фамилии, описав его в статье *Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors* журнала *Communications of the ACM* в 1970 году.

1 Структура фильтра Блума

1.1 Составные компоненты

Фильтр задействует два главных (и единственных) компонента — битовый массив (рис. 1.1) и некоторое фиксированное количество хеш-функций.

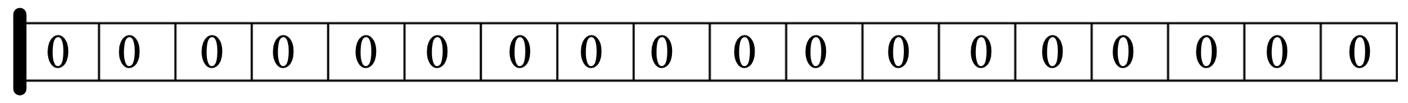


Рисунок 1.1 — Массив битов

Как и для хеш-таблицы, взятое множество хеш-функций должно давать равномерное распределение результатов хеширования и минимальное число коллизий. Если разработчик не хочет сильно утруждаться «придумыванием» множества хеш-функций, можно добавлять/отнимать от составных частей хеш-функции () некоторый итератор (1, 2, 3… для соответствующих вызовов одного и того же ключа), для чего нужна хеш-функция с подобающим лавинным эффектом.

1.2  Алгоритм работы

Создание фильтра: выделяется память под битовый массив некоторого размера, исходя из количества элементов и количества хеш-функций. Все биты в массиве битов приравниваются к 0 (демонстрация созданного фильтра Блума — рис.1.1).

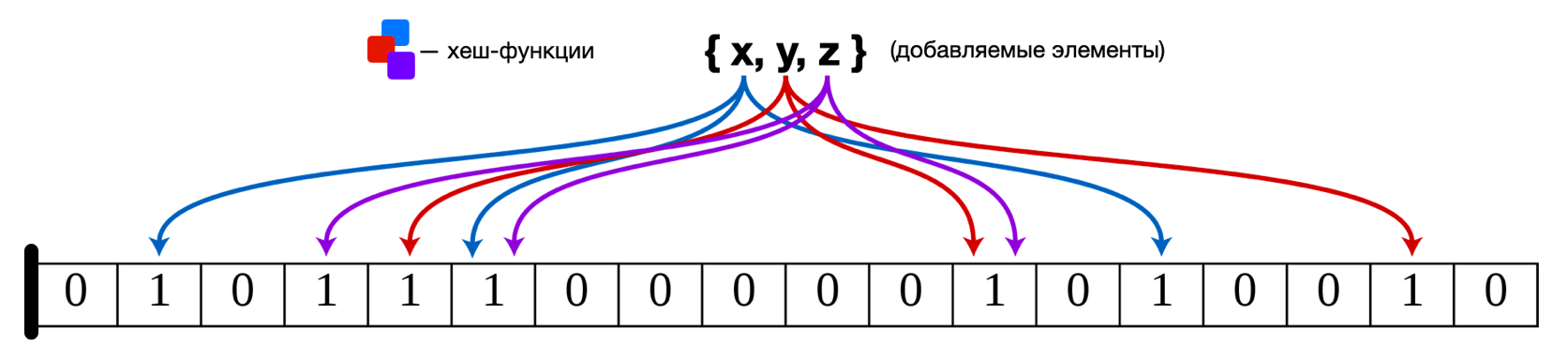
Добавление элемента: строковый ключ подаётся в хеш-функции, на выход программа получает результат в виде индексов в массиве битов. Биты на данных местах устанавливаются в 1. Модификация: перед добавлением проверить, нет ли данного элемента уже в множестве.

Рисунок 1.2 — добавление элементов в фильтр Блума

Проверка на вхождение в множество (поиск): строковый элемент подаётся в хеш-функции, на выход программа получает результат в виде индексов в массиве битов. Проверяется, все ли биты на соответствующих позициях равны 1. Если да, элемент возможно есть в фильтре. Если нет (хотя бы один из битов равен 0) — элемента гарантировано нет в фильтре (рис.1.3), а на местах, где биты были равны 1, мы столкнулись с результатом хеша для других элементов (коллизия) (рис.1.4).

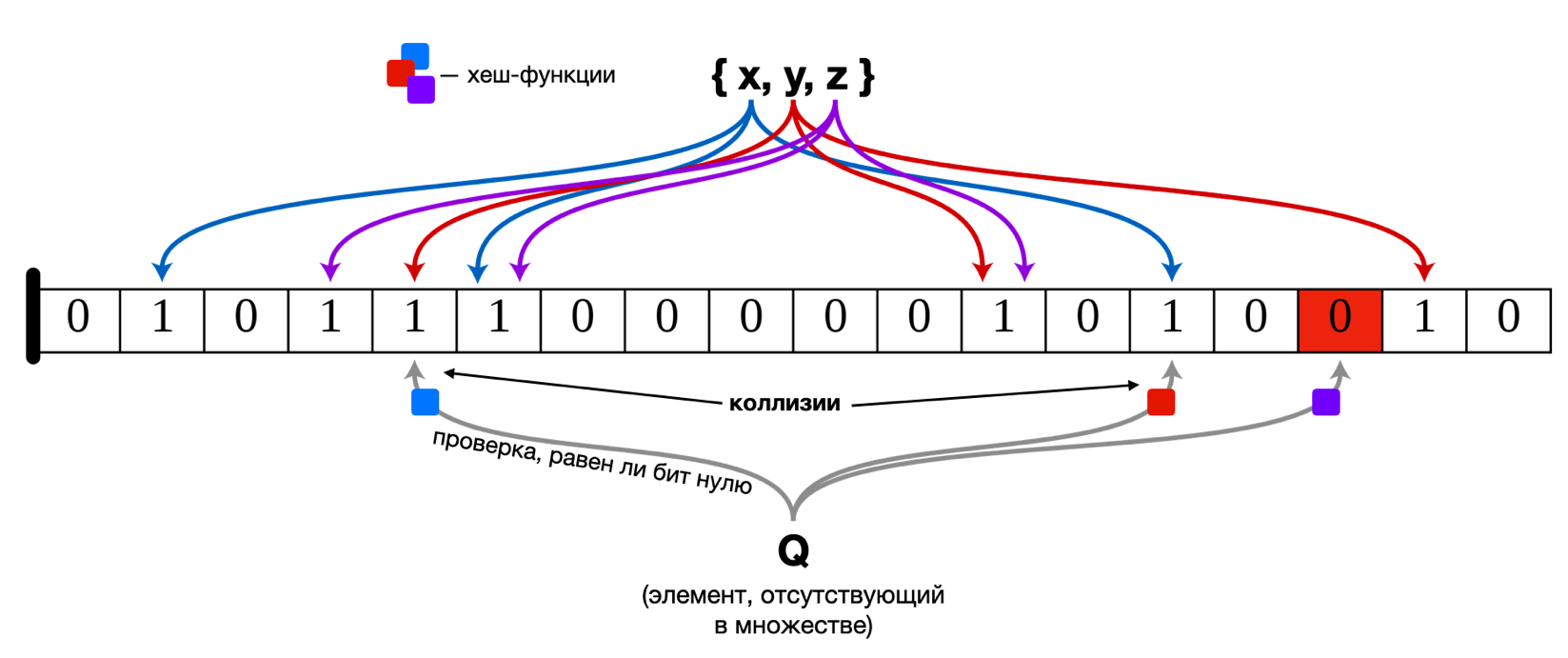


Рисунок 1.3 — проверка строкового ключа на вхождение в множество (случай 1)

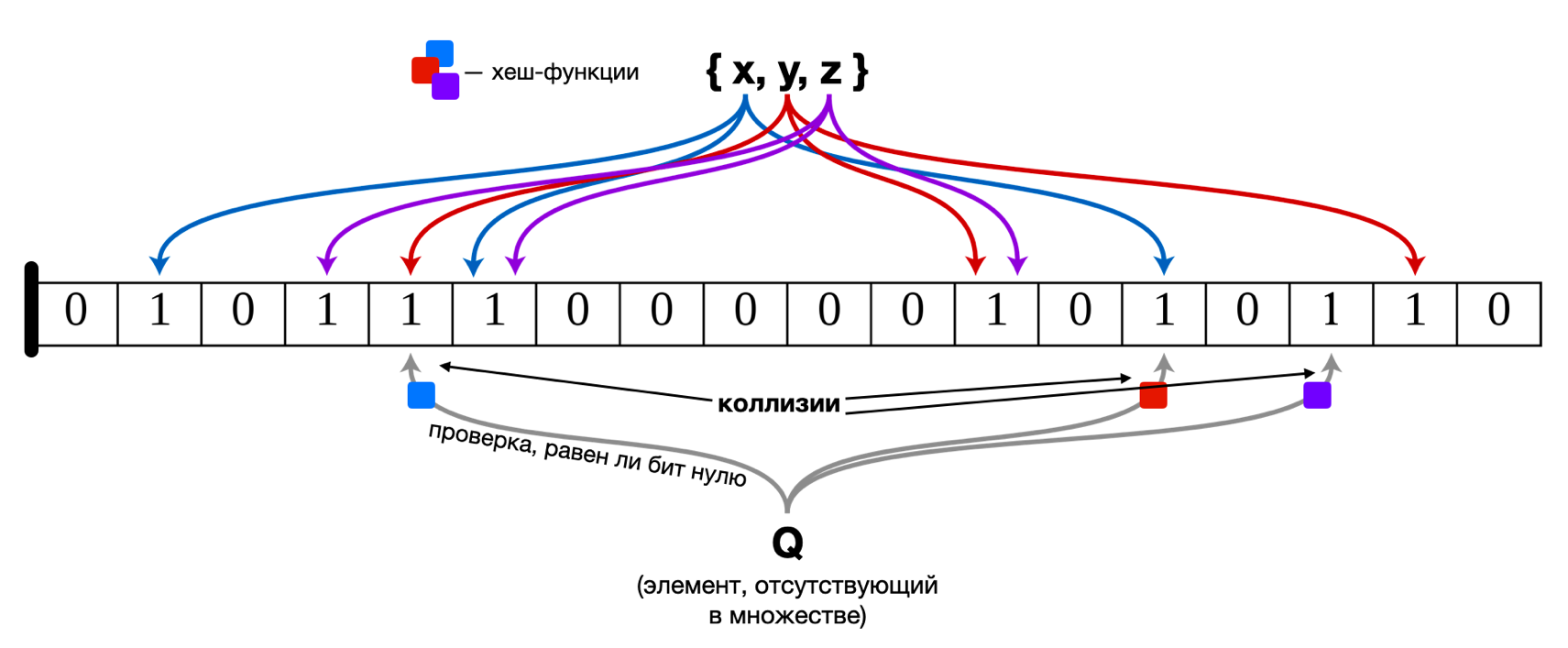


Рисунок 1.4 — проверка строкового ключа на вхождение в множество (случай 2)

1.3 Оптимальные значения параметров фильтра Блума

Главный недостаток фильтра Блума — вероятность получения ложноположительного результата, из-за чего разработчику необходимо подобрать оптимальные параметры для размера массива битов и количества хеш-функций: даже если взять слишком много того и другого (что непременно даст положительный результат в уменьшении вероятности ложноположительного результата), программа задействует неоптимальный объём памяти и будет тратить больше времени на заполнение массива битов.

Прибегнем к математическому анализу данной проблемы:

*m* — размер битового массива (фильтра Блума)

*n* — количество элементов

*k* — количество хеш-функций

— вероятность хеш-функции не установить определённый бит в 1

*—* вероятность для *k* хеш-функций не установить определённый бит в 1

—вероятность того, что после вставки *n* элементов *k* хеш-функциями определённый бит равен 0

— вероятность того, что после вставки *n* элементов *k* хеш-функциями определённый бит равен 1

Таким образом, — вероятность ложноположительного срабатывания «поиска» в фильтре Блума (вероятность того, что для отсутствующего элемента каждая позиция (бит), вычисленная *k* хеш-функциями, будет равна 1).

*=> k —* оптимальноеколичество хеш-функций, минимизирующее ложноположительные срабатывания ( – количество битов на один элемент) => подстановка: =>

Выражаем (количество битов на элемент): , а далее выражаем *m* (размер фильтра): .

Мы нашли оптимальные значения параметров для фильтра Блума с любым количеством элементов и вероятностью ложноположительного срабатывания.

1.4 Выводы

Операции добавления и «поиска» (на самом же деле — проверки на отсутствие в фильтре) некоторого ключа в фильтре Блума сопоставимы с теми же операциями в хеш-таблицах: они задействуют только хеш-функции, чья вычислительная сложность равна **O(1)** или, если более точно, **O(*m*)**, где *m* – длина строкового ключа.

2 Экспериментальное исследование эффективности алгоритма

2.1 Организация моделирования

Хеш-функция, вариации которой используются для получения индексов в массив битов — FNV-1a. Она не является криптографической (что в нашем случае и не требуется: вряд ли кто-то будет взламывать фильтр Блума, ведь его единственное назначение — проверка строкового ключа на отсутствие в фильтре) и показывает хорошие результаты в равномерном распределении значений, а соответственно и в меньшем количестве коллизий. Также FNV-1a более адаптивна к изменению её базового значения (*hash\_base* или *hash\_value*), что позволяет нам, например, отнимать от этого значения наш итератор без ухудшения лавинного эффекта функции и распределения её хеша (главную роль в FNV-1a всё же играет простое число *FNV\_32\_PRIME*).

Для работы с битами был создан отдельный модуль bits.c, в котором обозначены функции задания конкретного бита в 1 (*set\_bit()*), проверки его значения (*get\_bit()*) и очистки (установки в 0) (*clear\_bit()*). Базой для работы с битами установлен тип *uint\_8t*, который содержит в записи натурального числа ровно 8 бит. Соответственно, битовый массив на от 1 до 8 элементов будет содержать лишь одно такое число, от 9 до 16 — 2 числа типа *uint8\_t* и т.д.

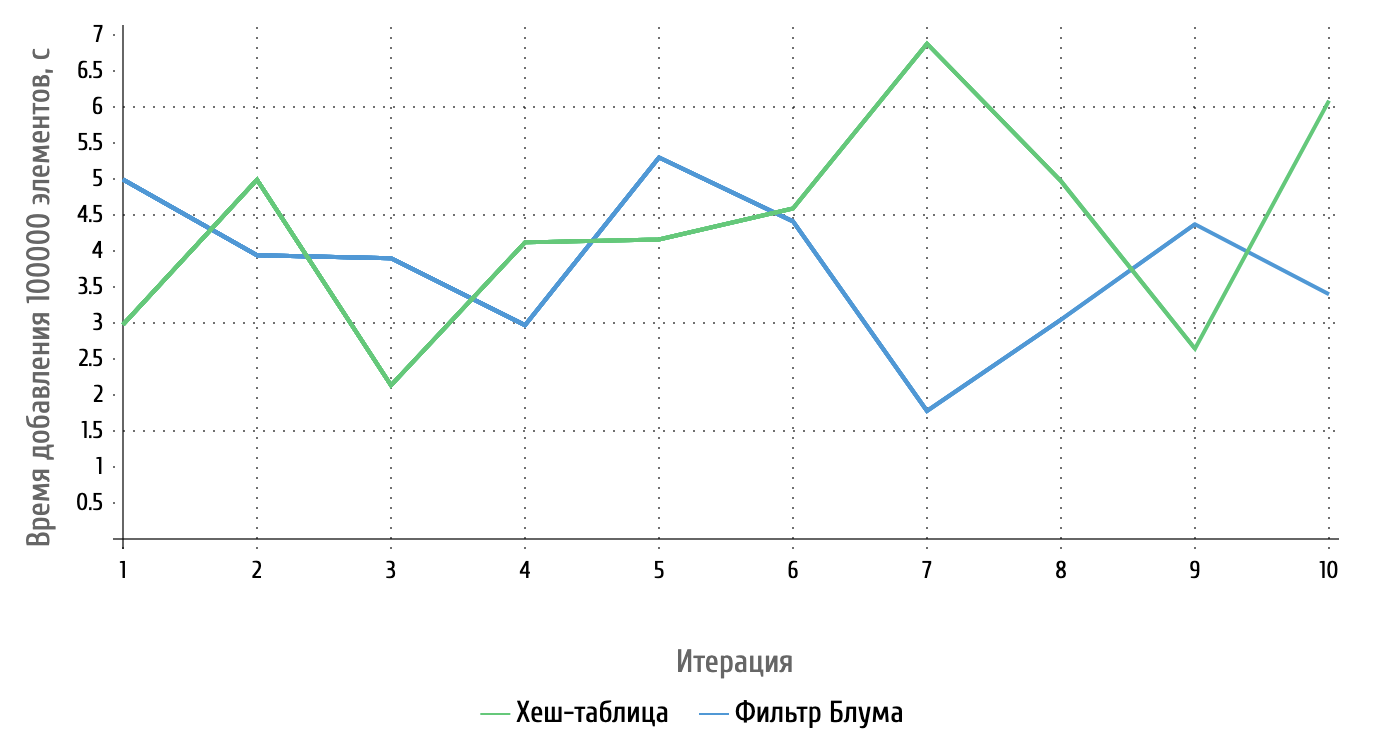
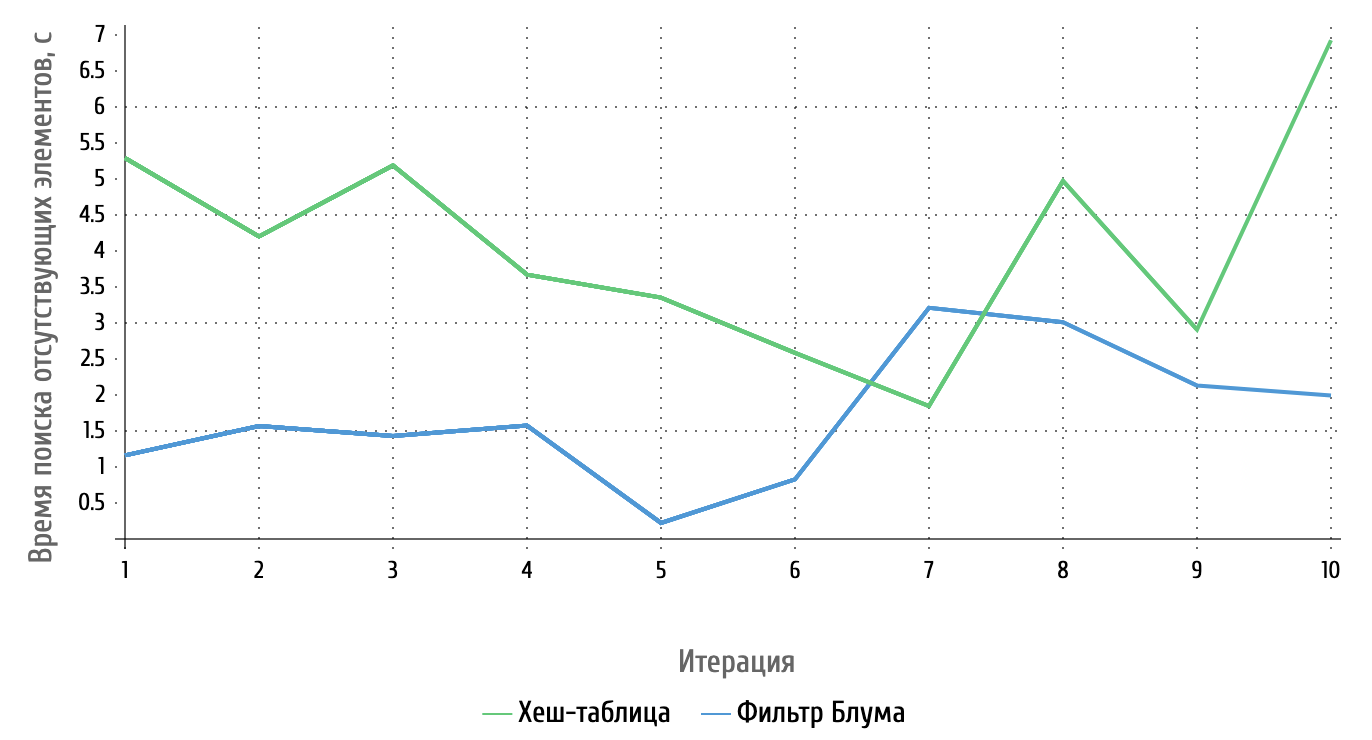
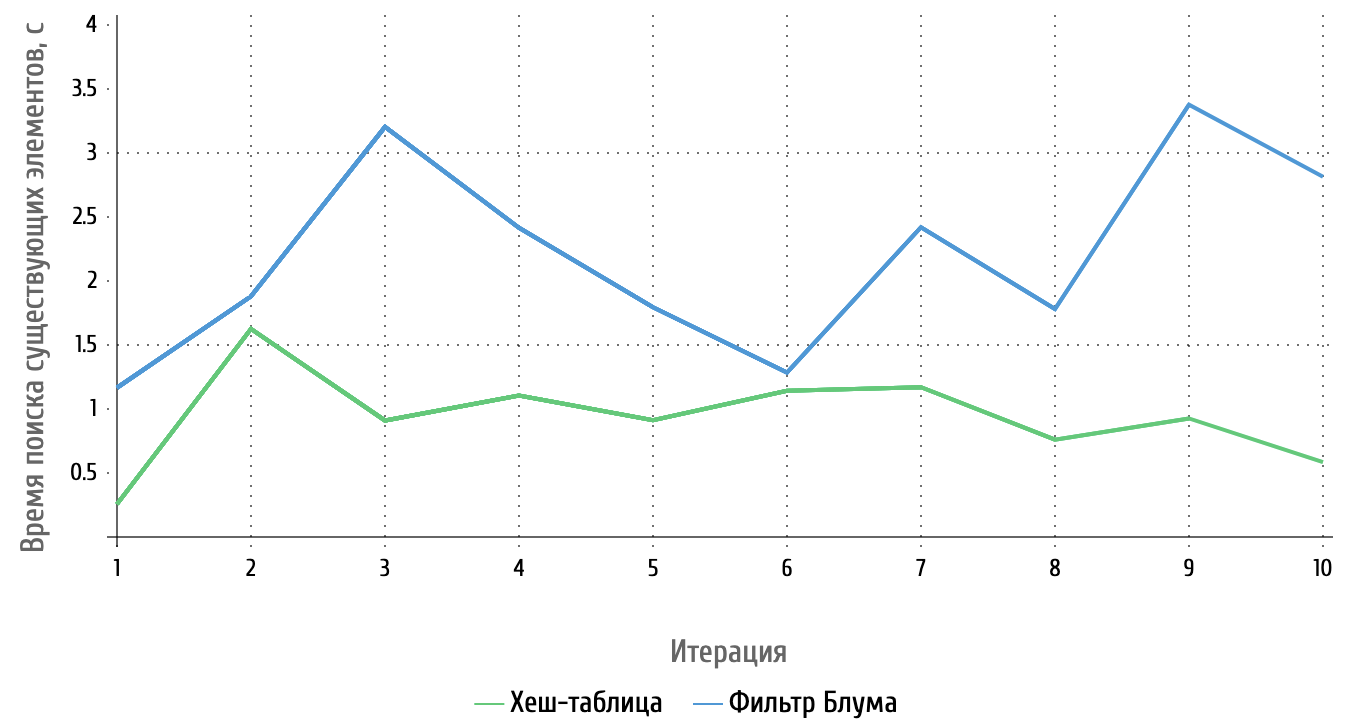
Модуль для работы с фильтром Блума — *bloom.c*, в котором описана структура фильтра (массив битов — *uint8\_t \*bits*, размер фильтра *m*, количество хеш-функций *k*) и функции для работы с ним: *bloom\_init()* для инициализации фильтра Блума, принимающая на вход количество элементов и желаемую вероятность получения ложноположительного результата — в ней также используются функции *bloom\_optimalFilterSize()* и *bloom\_optimalHashNumber()* для нахождения оптимальных значений размера фильтра и количества хеш-функций (максимального итератора) соответственно, *bloom\_lookup()* — для «поиска» строкового ключа в фильтре Блума (проверки на его отсутствие), *bloom\_insert()* для вставки в фильтр и *bloom\_FNVHash()* для получения хеша от заданного ключа и итератора.

Также в ходе работы для экспериментального сравнения фильтра Блума с другой структурой данных, был добавлен модуль для работы с хеш-таблицами с закрытой адресацией.

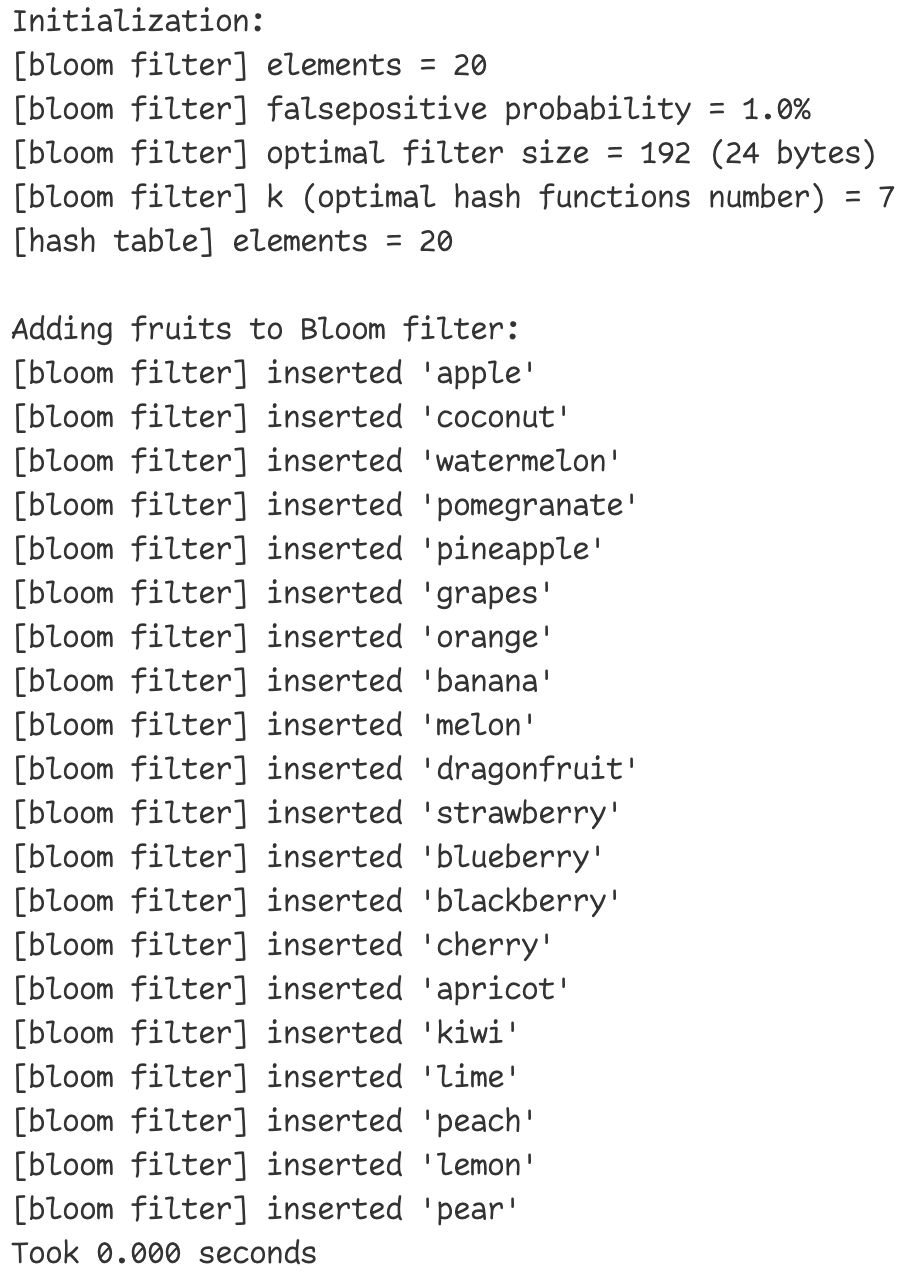
В файле тестовой программы (*main.c*) происходит следующее: инициализация нового фильтра Блума для 20 элементов и вероятностью ложноположительного результата в 1% (0,01), инициализация пустой хеш-таблицы размером в 20 элементов. Далее вставка одних и тех же элементов в фильтр Блума и хеш-таблицу. В результатах моделирования можно также заметить, что хеш-таблица сообщает о количестве созданных коллизий, которые далее придётся обрабатывать при поиске элементов. Теперь происходит проверка всех уже входящих в структуры данных ключей. Фильтр Блума в этом случае работает медленнее, если хеш-таблица имеет мало коллизий: в ней нужно посчитать лишь одну хеш-функцию, а в фильтре Блума — какое-то большее число. После проверки всех уже находящихся в структурах данных элементов, программа проверяет сторонние ключи. Результат ожидаем — фильтр и хеш-таблицы сообщают нам, что данных строковых ключей точно нет в структурах данных, и приводятся временные показатели для сравнения. Здесь у фильтра Блума нет равных — результаты превосходят хеш-таблицу, так как в хеш-таблице при коллизии какого-то стороннего ключа с уже внесённым в хеш-таблицу, производится проход по всему связному списку. Для всех операций над структурами данных в терминал также выводится лог их работы со специальными префиксами.

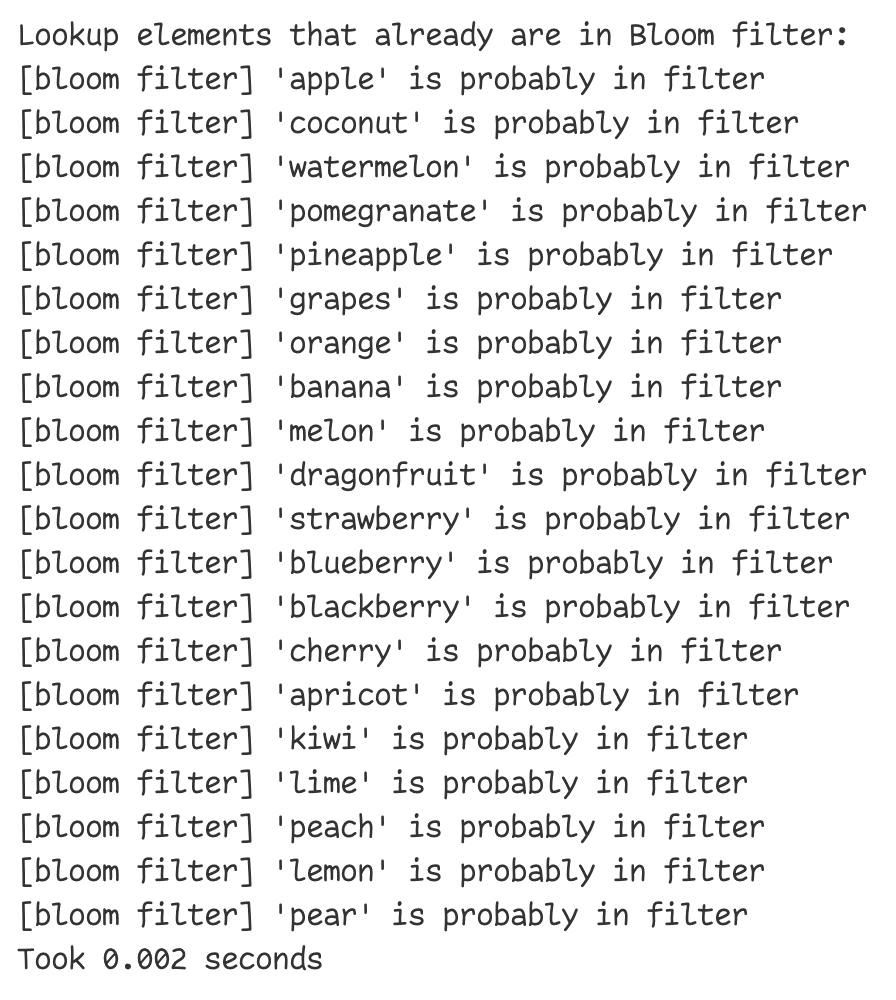
2.2 Результаты моделирования

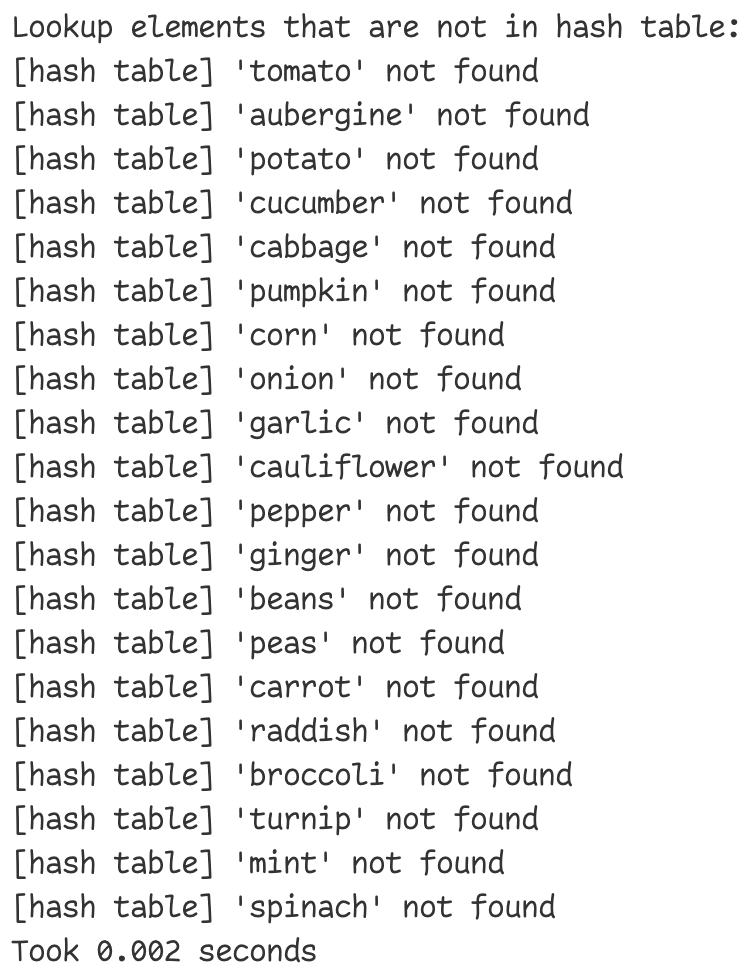
Диаграммы, показывающие время исполнения операций над структурами данных — внесением в них 100000 элементами, поиском 100000 этих же элементов и поиском 100000 не входящих в структуру данных элементов.



Скриншоты результатов работы программы для двадцати элементов:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы разработан и исследован фильтр Блума.

Осуществлено моделирование структуры данных. Показано, что фильтр Блума временно- и пространственно-эффективен в задаче на гарантированное отсутствие строкового ключа в множестве. Также стоит заметить, что это вероятностная структура данных с возможным получением от неё ложноположительного результата, которая применяется в основном как предварительный фильтр запросов, и для последующего поиска возможно существующего элемента применяются «медленные» и точные алгоритмы поиска. Фильтр Блума создаётся исходя из количества элементов множества и желаемой вероятности ошибки (ложноположительного результата). Он не поддерживает операцию удаления строкового ключа из фильтра, т.к. это может затронуть результаты хеширования других элементов, а значит при их поиске может быть выдан результат «гарантированного отсутствия в фильтре».

Фильтр Блума используется во многих продуктах, связанных с хранением данных (Google BigTable, Apache HBase, Apache Cassandra, PostgreSQL), системами архивного хранения (Venti, WebArchive), блокчейн-системах (Ethereum).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Burton H. Bloom* Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors // Communications of the ACM. – 1970. – T. 13. – №7. – С. 422-426.
2. *Fay Chang, Jeffrey Dean, Sanjay Ghemawat, Wilson C. Hsieh, Deborah A. Wallach, Mike Burrows, Tushar Chandra, Andrew Fikes, Robert E. Gruber* Bigtable: A Distributed Storage System for Structured Data // 7th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI). – Berkeley: USENIX, 2006. – С. 205-218.
3. *Adam Kirsch, Michael Mitzenmacher* Less Hashing, Same Performance: Building a Better Bloom Filter, edited by Yossi Azar, Thomas Erlebach, Algorithms // ESA 2006, 14th Annual European Symposium, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science. – 2006. – T. 4168. – С. 456–467.
4. *Alex Yakunin* Nice Bloom filter application // Alex Yakunin's blog URL: blog.alexyakunin.com (дата обращения: 20.11.2022).
5. *Jamie Talbot* What are Bloom filters? // Medium URL: https://blog.medium.com/what-are-bloom-filters-1ec2a50c68ff#.xlkqtn1vy (дата обращения: 22.11.2022).
6. *Michael Mitzenmacher, Eli Upfal* Probability and computing: Randomized algorithms and probabilistic analysis. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – С. 107–112.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1 Исходный код программы

1.1 Файл “main.c”

|  |  |
| --- | --- |
| 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25  26  27  28  29  30  31  32  33  34  35  36  37  38  39  40  41  42  43  44  45  46  47  48  49  50  51  52  53  54  55  56  57  58  59  60  61  62  63  64  65  66  67  68  69  70  71  72  73  74  75  76  77  78  79  80  81  82  83  84  85  86  87  88  89  90  91  92  93  94  95  96  97  98  99  100  101  102  103  104  105  106  107  108  109  110  111  112  113  114  115  116  117  118  119  120  121  122  123  124  125  126  127  128  129  130  131  132  133  134  135  136  137  138  139  140  141  142  143  144  145  146  147  148  149  150  151  152  153  154  155  156  157  158  159  160  161  162  163  164  165  166  167  168  169  170  171  172  173  174  175  176  177  178  179  180  181  182  183  184  185  186  187  188  189  190  191  192  193  194  195  196  197  198  199  200  201  202  203  204  205  206  207  208  209  210  211  212  213  214  215  216  217  218  219  220  221  222  223  224  225  226  227  228  229  230  231  232  233  234  235  236  237  238  239  240  241  242  243  244  245  246  247  248  249  250  251  252  253  254  255  256  257  258  259  260  261  262  263  264  265  266  267  268  269  270  271  272  273  274  275  276  277  278 | #include "bloom.h"  #include "hashtab.h"  #include <stdio.h>  #include <time.h>  #include <stdlib.h>  **double** **wtime**() {  **struct** timespec time;  clock\_gettime(CLOCK\_REALTIME, &time);  **return** ((**double**)time.tv\_sec + (**double**)time.tv\_nsec / **100000000**);  }  **void** **filter\_inserting**(BloomFilter \*f) {  bloom\_insert(f, "apple");  bloom\_insert(f, "coconut");  bloom\_insert(f, "watermelon");  bloom\_insert(f, "pomegranate");  bloom\_insert(f, "pineapple");  bloom\_insert(f, "grapes");  bloom\_insert(f, "orange");  bloom\_insert(f, "banana");  bloom\_insert(f, "melon");  bloom\_insert(f, "dragonfruit");  bloom\_insert(f, "strawberry");  bloom\_insert(f, "blueberry");  bloom\_insert(f, "blackberry");  bloom\_insert(f, "cherry");  bloom\_insert(f, "apricot");  bloom\_insert(f, "kiwi");  bloom\_insert(f, "lime");  bloom\_insert(f, "peach");  bloom\_insert(f, "lemon");  bloom\_insert(f, "pear");  }  **void** **ht\_inserting**(listnode \*\*hashtab, **int** size, **int** \*collisions) {  **int** v = **1**;  hashtab\_add(hashtab, "apple", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "coconut", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "watermelon", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "pomegranate", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "pineapple", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "grapes", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "orange", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "banana", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "melon", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "dragonfruit", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "strawberry", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "blueberry", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "blackberry", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "cherry", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "apricot", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "kiwi", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "lime", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "peach", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "lemon", v++, size, collisions);  hashtab\_add(hashtab, "pear", v++, size, collisions);  }  **void** **filter\_searching\_in**(BloomFilter \*f) {  bloom\_lookup(f, "apple");  bloom\_lookup(f, "coconut");  bloom\_lookup(f, "watermelon");  bloom\_lookup(f, "pomegranate");  bloom\_lookup(f, "pineapple");  bloom\_lookup(f, "grapes");  bloom\_lookup(f, "orange");  bloom\_lookup(f, "banana");  bloom\_lookup(f, "melon");  bloom\_lookup(f, "dragonfruit");  bloom\_lookup(f, "strawberry");  bloom\_lookup(f, "blueberry");  bloom\_lookup(f, "blackberry");  bloom\_lookup(f, "cherry");  bloom\_lookup(f, "apricot");  bloom\_lookup(f, "kiwi");  bloom\_lookup(f, "lime");  bloom\_lookup(f, "peach");  bloom\_lookup(f, "lemon");  bloom\_lookup(f, "pear");  }  **void** **ht\_searching\_in**(listnode \*\*hashtab, **int** size) {  hashtab\_lookup(hashtab, "apple", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "coconut", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "watermelon", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "pomegranate", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "pineapple", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "grapes", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "orange", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "banana", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "melon", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "dragonfruit", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "strawberry", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "blueberry", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "blackberry", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "cherry", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "apricot", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "kiwi", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "lime", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "peach", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "lemon", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "pear", size);  }  **void** **filter\_searching\_out**(BloomFilter \*f) {  bloom\_lookup(f, "tomato");  bloom\_lookup(f, "aubergine");  bloom\_lookup(f, "potato");  bloom\_lookup(f, "cucumber");  bloom\_lookup(f, "cabbage");  bloom\_lookup(f, "pumpkin");  bloom\_lookup(f, "corn");  bloom\_lookup(f, "onion");  bloom\_lookup(f, "garlic");  bloom\_lookup(f, "cauliflower");  bloom\_lookup(f, "pepper");  bloom\_lookup(f, "ginger");  bloom\_lookup(f, "beans");  bloom\_lookup(f, "peas");  bloom\_lookup(f, "carrot");  bloom\_lookup(f, "raddish");  bloom\_lookup(f, "broccoli");  bloom\_lookup(f, "turnip");  bloom\_lookup(f, "mint");  bloom\_lookup(f, "spinach");  }  **void** **ht\_searching\_out**(listnode \*\*hashtab, **int** size) {  hashtab\_lookup(hashtab, "tomato", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "aubergine", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "potato", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "cucumber", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "cabbage", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "pumpkin", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "corn", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "onion", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "garlic", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "cauliflower", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "pepper", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "ginger", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "beans", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "peas", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "carrot", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "raddish", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "broccoli", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "turnip", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "mint", size);  hashtab\_lookup(hashtab, "spinach", size);  }  **int** **main**() {  **double** start, end, t;  **int** col = **0**;  printf("Initialization:**\n**");  **int** size = **20**;  BloomFilter \*f = bloom\_init(size, **0.01**); // create a filter of 10 elements with falsepositive probability 1%  listnode \*\*hashtab = malloc(**sizeof**(listnode\*) \* size);  hashtab\_init(hashtab, size);    printf("**\n**Adding fruits to Bloom filter:**\n**");  start = wtime();  filter\_inserting(f);  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds**\n**", t);  printf("**\n**Adding fruits to hash table with closed addressation:**\n**");  start = wtime();  ht\_inserting(hashtab, size, &col);  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds, made %d collisions**\n**", t, col);  printf("**\n**Lookup elements that already are in Bloom filter:**\n**");  start = wtime();  filter\_searching\_in(f);  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds**\n**", t);  printf("**\n**Lookup elements that already are in hash table:**\n**");  start = wtime();  ht\_searching\_in(hashtab, size);  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds**\n**", t);  printf("**\n**Lookup elements that are not in Bloom filter:**\n**");  start = wtime();  filter\_searching\_out(f);  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds**\n**", t);  printf("**\n**Lookup elements that are not in hash table:**\n**");  start = wtime();  ht\_searching\_out(hashtab, size);  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds**\n\n**", t);  bloom\_free(f);    /\*char words[200000][8];  FILE \*inp = fopen("words.txt", "r");  for(int i = 0; !feof(inp); i++) {  char r = (char)fgetc(inp);  int k = 0;  while (r != '\n' && !feof(inp)) {  words[i][k++] = r;  r = (char)fgetc(inp);  }  words[i][k] = '\0';  }  size = 100000;  BloomFilter \*f2 = bloom\_init(size, 0.05);  listnode \*\*hashtab2 = malloc(sizeof(listnode\*) \* size);  hashtab\_init(hashtab2, size);  printf("\nInserting 100000 words in Bloom filter:\n");  start = wtime();  for(int i = 0; i < 100000; i++) {  bloom\_insert(f2, words[i]);  }  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds\n", t);    printf("\nInserting 100000 words in hash table:\n");  start = wtime();  for(int i = 0; i < 100000; i++) {  hashtab\_add(hashtab2, words[i], i, size, &col);  }  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds, made %d collisions\n", t, col);  printf("\nLooking up 100000 words that are in Bloom filter:\n");  start = wtime();  for(int i = 0; i < 100000; i++) {  bloom\_lookup(f2, words[i]);  }  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds\n", t);    printf("\nLooking up 100000 words that are in hash table:\n");  start = wtime();  for(int i = 0; i < 100000; i++) {  hashtab\_lookup(hashtab2, words[i], size);  }  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds\n", t);    printf("\nLooking up 100000 words that are not in Bloom filter:\n");  start = wtime();  for(int i = 100000; i < 200000; i++) {  bloom\_lookup(f2, words[i]);  }  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds\n", t);    printf("\nLooking up 100000 words that are not in hash table:\n");  start = wtime();  for(int i = 100000; i < 200000; i++) {  hashtab\_lookup(hashtab2, words[i], size);  }  end = wtime();  t = end - start;  printf("Took %.3f seconds\n", t);  bloom\_free(f2);\*/  **return** **0**;  } |

1.2 Файл “bits.c”

|  |  |
| --- | --- |
| 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25  26  27  28  29  30 | #include "bits.h"  #include <inttypes.h>  void set\_bit(uint8\_t A[], int k)  {  int i = k / 8; *// index in the array A*  int pos = k % 8; *// bit position in A[i]*  unsigned int flag = 1; *// flag 00001*  flag = flag << pos; *// flag shifted k positions (e.g. 00100)*  A[i] = A[i] | flag; *// set the bit at k position in A[i] to 1*  }  void clear\_bit(uint8\_t A[], int k)  {  int i = k / 8;  int pos = k % 8;  unsigned int flag = 1;  flag = flag << pos;  flag = ~flag; *// negative (e.g. 11011)*  A[i] = A[i] & flag;  }  uint8\_t get\_bit(uint8\_t A[], int k)  {  int i = k / 8;  int pos = k % 8;  unsigned int flag = 1;  flag = flag << pos;  **return** ((A[i] & flag) != 0); *// compare xxXxx & 00100 - getting needed bit*  } |

1.3 Файл “bits.h”

|  |  |
| --- | --- |
| 1  2  3  4  5  6  7 | #pragma once  #include <inttypes.h>  void set\_bit(uint8\_t A[], int k);  void clear\_bit(uint8\_t A[], int k);  uint8\_t get\_bit(uint8\_t A[], int k); |

1.4 Файл “bloom.c”

|  |  |
| --- | --- |
| 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25  26  27  28  29  30  31  32  33  34  35  36  37  38  39  40  41  42  43  44  45  46  47  48  49  50  51  52  53  54  55  56  57  58  59  60  61  62  63  64  65  66  67  68  69  70  71  72  73 | #include "bloom.h"  #include "bits.h"  #include <math.h>  #include <stdio.h>  #include <stdlib.h>  #define BITS\_FOR\_TYPE 8.0 // for uint8\_t  #define FNV\_32\_PRIME 16777619  **char** \*bloom\_prefix = "[bloom filter]";  **unsigned** **int** **bloom\_FNVHash**(**const** **char** \*key, **int** i) // fnv-1a  {  **unsigned** **int** hash\_value = **2166136261** - i; // for different hash functions  **while**(\*key) {  hash\_value ^= (**unsigned** **int**)\*key++;  hash\_value \*= FNV\_32\_PRIME;  }  **return** hash\_value;  }  **int** **bloom\_optimalFilterSize**(**unsigned** **int** n, **double** p) // n - number of elements  { // p - probability of false positive  **return** (**unsigned** **int**) ceil(-((**double**) n \* log(p)) / (log(**2**) \* log(**2**)));  }  **int** **bloom\_optimalHashNumber**(**unsigned** **int** n, **unsigned** **int** m) // n - number of elements  { // m - filter size  **return** (**unsigned** **int**) ceil(((**double**) m / (**double**) n) \* log(**2**));  }  BloomFilter \***bloom\_init**(**unsigned** **int** number\_of\_elements, **double** falsepositive\_probability)  {  printf("%s n (elements) = %d**\n**", bloom\_prefix, number\_of\_elements);  printf("%s p (falsepositive probability) = %.1f%%**\n**", bloom\_prefix, falsepositive\_probability\***100**);  BloomFilter \*f = malloc(**sizeof**(BloomFilter));  **if**(f != NULL) {  printf("%s malloc \*f - success**\n**", bloom\_prefix);  }  f->m = bloom\_optimalFilterSize(number\_of\_elements, falsepositive\_probability);  **int** arraySize = (**int**) ceil(f->m / BITS\_FOR\_TYPE);  printf("%s m (optimal filter size) = %d (%d bytes)**\n**", bloom\_prefix, f->m, arraySize);  f->bits = malloc(**sizeof**(**uint8\_t**) \* arraySize);  **if**(f->bits != NULL) {  printf("%s malloc f->bits - success**\n**", bloom\_prefix);  }  **for**(**int** i = **0**; i < arraySize; i++) {  f->bits[i] = **0**;  }  f->k = bloom\_optimalHashNumber(number\_of\_elements, f->m);  printf("%s k (optimal hash functions number) = %d**\n**", bloom\_prefix, f->k);  **return** f;  }  **int** **bloom\_lookup**(BloomFilter \*f, **const** **char** \*s)  {  **for**(**int** i = **0**; i < f->k; i++) {  **if**(get\_bit(f->bits, bloom\_FNVHash(s, i) % f->m) == **0**) {  printf("%s '%s' is not in filter**\n**", bloom\_prefix, s);  **return** **0**;  }  }  printf("%s '%s' is probably in filter**\n**", bloom\_prefix, s);  **return** **1**;  }  **void** **bloom\_insert**(BloomFilter \*f, **const** **char** \*s)  {  **if**(!bloom\_lookup(f, s)){  **for**(**int** i = **0**; i < f->k; i++) {  set\_bit(f->bits, bloom\_FNVHash(s, i) % f->m);  }  printf("%s successfully inserted '%s'**\n**", bloom\_prefix, s);  }  } |

1.5 Файл “bloom.h”

|  |  |
| --- | --- |
| 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15 | #pragma once  #include <inttypes.h>  **typedef** **struct** {  **uint8\_t** \*bits;  **int** m; // filter size  **int** k; // number of hash functions  } BloomFilter;  **unsigned** **int** **bloom\_FNVHash**(**const** **char** \*key, **int** i);  **int** **bloom\_optimalFilterSize**(**unsigned** **int** n, **double** p);  **int** **bloom\_optimalHashNumber**(**unsigned** **int** n, **unsigned** **int** m);  BloomFilter \***bloom\_init**(**unsigned** **int** number\_of\_elements, **double** falsepositive\_probability);  **int** **bloom\_lookup**(BloomFilter \*f, **const** **char** \*s);  **void** **bloom\_insert**(BloomFilter \*f, **const** **char** \*s); |