

5. Организация и управление большими объектами

5.1. Большие объекты

5.2. Двухуровневое разбиение

5.3. Улучшенное двухуровневое разбиение

5.4. Древовидное представление

Большие объекты

- Большие (массивные) объекты (large objects - LOBs):
большие двоичные объекты (BLOBs) и большие символьные объекты (CLOBs)
- Для 'стандартной' СУБД: LOB - одно поле без внутренней структуры
- Традиционные реляционные СУБД имеют ограничение на максимальную длину поля (например, 255 байт или 32767 байт)
- Мультимедийные объекты как правило имеют значительно больший размер

Большие объекты

- Современные СУБД поддерживают поля длиной до 4ГБ, тем не менее:
 - Большие объекты могут не помещаться полностью в общей памяти
 - Необходима фрагментарная обработка (прямой доступ к отдельным фрагментам хранимого объекта): нерационально извлекать весь объект, если нужен только один его фрагмент
 - Доступ к объекту согласно его логической структуре осуществляется программными средствами более высокого уровня
 - Вспомогательная система хранения более универсальна: страницы с различной емкостью и разные по размерам кластеры страниц улучшат операции ввода/вывода для объектов переменной длины
 - Необходимо вести лог-файл (восстановление данных после ошибки): протоколирование всего объекта неэффективно, ведь только малая часть может быть повреждена

Большие объекты

SQL и поля большого размера:

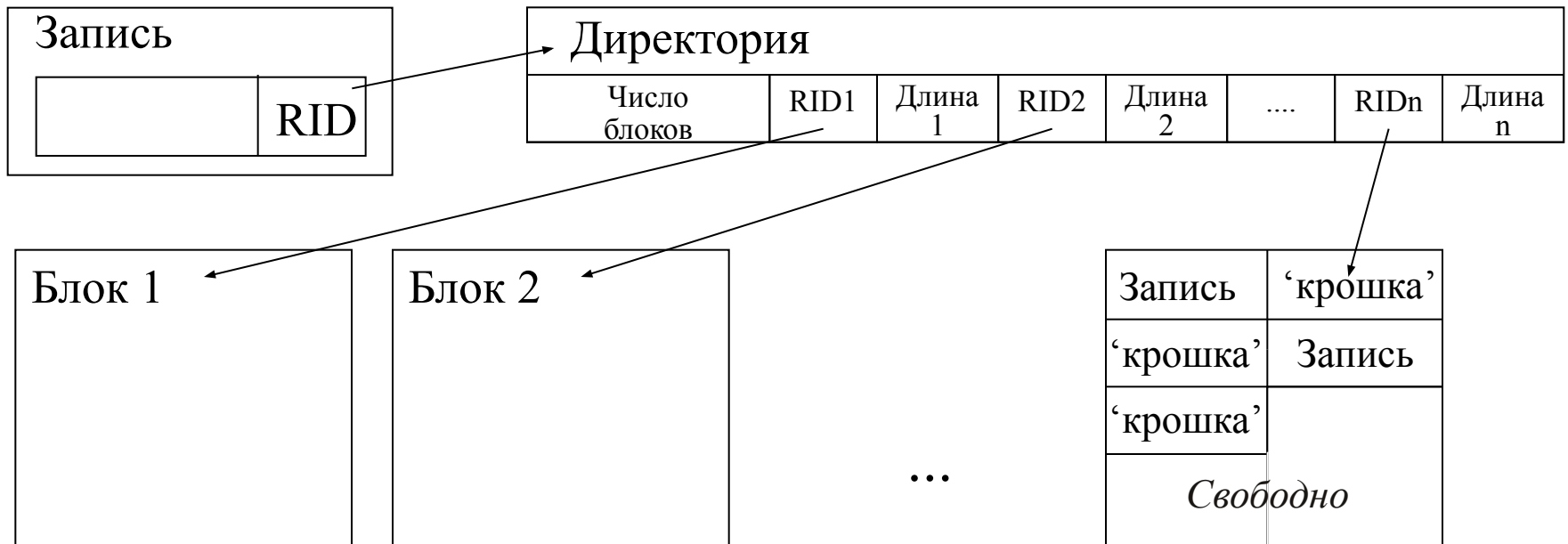
- Типы полей: символьные (CLOB) и двоичные (BLOB)
- Следующие операции возможны:
 - Конкатенация (concatenation)
 - Извлечение подстроки (substring)
 - Наложение (overlay): замена подстрок
 - Триммирование: удаление определенных символов (например, пробелов) в начале и конце строки
 - Определение позиции заданной подстроки внутри строки
- Не разрешены:
GROUP BY, ORDER BY, операции над множествами (UNION, INTERSECT)

Двухуровневое разбиение

- Пример архитектуры: система хранения данных Wisconsin Storage System (WiSS) [1]; реализована в нескольких СУБД, в частности, в прототипах объектно-ориентированных СУБД
- Позволяет хранить текстовые поля переменной длины и изображения
- Реализована в Unix-среде (но в обход файловой системы, т.к. хранение в последней осуществляется на физически разбросанных по дисковому пространству страницах небольшого размера)
- WiSS имеет свою собственную независимую от Unix буферизацию
- Поле большого размера являются частью записи (в бд) на логическом уровне, но физическое хранение обособлено
- Поле большого размера в WiSS состоит из:
 - Блоков (slices в оригинальной работе) данных на которые разбивается поле; размер блока ограничен размером страницы; последний блок (меньше размера страницы) называется 'крошка' (crumb в ориг.работе)
 - Директории, содержащей ссылки на блоки

Двухуровневое разбиение

- Директория – обычная запись, содержащая указатели на блоки (RIDs), а также их размеры
- Запись с полем большого размера фактически содержит указатель на директорию
- При создании большого поля: объект разбивается на блоки (одна страница на блок: размер блока = размер страницы, например, 4Кб); страница (частично незаполненная) с последним блоком ('крошкой') может также хранить 'крошки' других объектов или другие записи
- **Двухуровневое представление:**



Двухуровневое разбиение

Операции с полями большого размера:

- Извлечь N байт, начиная с позиции S :
 - 1) Определить блок, содержащий позицию S :
find Max k such that $length[1] + \dots + length[k-1] < S$
 - 2) Извлечь блоки $k, k+1, \dots$ до тех пор пока не будет извлечено N байт или не достигнут конец поля
- Вставить N байт, начиная с позиции S :
 - 1) Определить нужный блок (см. выше)
 - 2) Записать N байт после позиции S на странице с данным блоком, если на странице есть место для N байт; иначе разбить блок на позиции S
 - 3) Выделить достаточное количество новых страниц между двумя образовавшимися блоками
 - 4) Записать N байт в две 'расщепленные' страницы и выделенные новые страницы (равномерно распределяя нагрузку на страницы)
 - 5) Внести изменения в директорию

Двухуровневое разбиение

Операции с полями большого размера:

- Удалить N байт, начиная с позиции S :
 - 1) Определить затрагиваемые страницы
 - 2) Удалить N байт, высвободить пустые страницы
 - 3) Объединить первый и последний затронутый блоки на одной странице, если возможно
 - 4) Внести изменения в директорию

Двухуровневое разбиение

- Размер хранимого поля:
 - В WiSS директория может занимать не более чем одну страницу
 - Для страниц размером 4Кб: директория может содержать примерно 400 пар «размер блока, указатель на блок». Таким образом, верхний предел размера для поля – 1.6Мб. Достаточно для текста и большинства графических изображений, но не для аудио и видео.
 - Для 8Кб-страниц: максимальный размер поля - 6.4Мб (800*8Кб)
 - Страницы большого размера неэффективны (значительная фрагментация вследствие обновлений)
- Очевидный обходной путь: дробление поля большого размера на несколько подполей максимально возможного размера (например, по 1.6Мб в случае 4Кб-страниц)
- WiSS не удовлетворяет требованиям многих мультимедийных приложений

Улучшенное двухуровневое разбиение

- Пример архитектуры: менеджер больших объектов Starburst [2]; прототип экспериментальной СУБД, разработанный в IBM
- Элегантная и весьма быстрая двухуровневая схема для полей большого размера
- Идея: хранить поле на нескольких физически смежных сегментах переменной длины; при этом размеры сегментов задаются экспоненциальной функцией (далее подробнее)
- Размеры сегментов с данными не произвольны, указатели на сегменты также не произвольны

Улучшенное двухуровневое разбиение

Система 'близнецов' (buddy system) [3]:

Пространство 'близнецов' состоит из 2^n страниц, сегментам размером в 2^k страниц разрешено иметь адреса $0, 2^k, 2 \cdot 2^k, 3 \cdot 2^k, \dots$ (т.е. адрес таких сегментов кратен 2^k)

- Два соседних сегмента одного и того же размера в 2^k страниц называются близнецами, если их объединение (сегмент размером в 2^{k+1} страниц) имеет разрешенный адрес

Например, сегменты 1,2 и 3,4 – близнецы, а сегменты 2,3 нет:

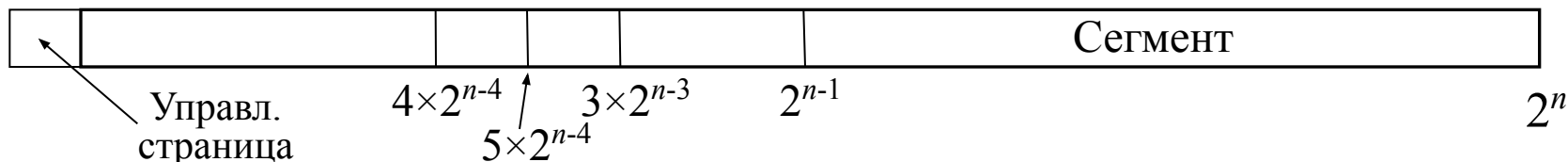


- Для каждого сегмента адрес его близнеца определяется XORом (операцией 'исключающее ИЛИ') адреса сегмента и размера сегмента
- Практическое достоинство: более короткие указатели, т.к. число возможных размеров сегментов ограничено

Улучшенное двухуровневое разбиение

Организация памяти в Starburst:

- Вся имеющаяся память представлена несколькими дисковыми пространствами (например, физический диск - пространство)
- Каждое из пространств содержит массив пространств близнецов
- Пространство близнецов состоит из:
 - Управляющей страницы (подробно о ее структуре в [2])
 - 2^n страниц с данными (сгруппированные в сегменты)



- Управляющая страница содержит:
 - Количество свободных сегментов каждого размера (размеры сегментов фиксированы - 1, 2, 4, 8, ..., 2^n страниц)
 - Указатели на свободные сегменты (точнее, на позиции, начиная с которых могут находиться свободные сегменты данного размера)

Улучшенное двухуровневое разбиение

- Выделение места:
 1. Выбрать наиболее подходящий сегмент
 2. Если сегмент слишком большой, то разбить его пополам, возможно несколько раз; добавить остающиеся части (сегменты меньших размеров) в списки свободных сегментов
- Освобождение сегмента:
 1. Проверить близнеца; если он свободен, объединить сегменты (и повторить данный шаг)
 2. Внести изменения в управляющей странице (сегменты, которые были объединены, удалить из списков, а объединенный (возможно неоднократно) сегмент добавить в списки свободных сегментов)
- Обновление данных:

Поддерживается только добавление данных в конец (актуально для хранения лог-файлов)
- Проблема фрагментации (типичная проблема для системы близнецов) частично решается за счет разбиения большого объекта на несколько частей
- Для любого поля большого размера вследствие фрагментации теряется не более одной страницы

Улучшенное двухуровневое разбиение

Дескриптор поля большого размера в Starburst:

- Дескриптор представляет собой директорию указателей на сегменты с данными в пространстве близнецов
- Размер дескриптора не более 255 байт; хранится в записи, имеющей поле большого размера
- Дескриптор содержит:
 - Идентификатор дискового пространства
 - Размер поля (**в байтах**)
 - Число сегментов
 - Размеры первого и последнего сегмента (компактно в виде $\log_2(\text{size})$)
 - Указатели (относительные) на сегменты (не более 80)

Улучшенное двухуровневое разбиение

Создание поля большого размера:

- Если размер (поля) известен, с самого начала использовать достаточно большие сегменты
- Если размер неизвестен, выделять сегменты с последовательно удваивающимся размером: размером в 1 страницу, в 2 страницы, в 4, в 8 и т.д. до тех пор пока поле не окончится или пока не будет достигнут максимальный размер сегмента; последовательность сегментов максимального размера выделяется до тех пор пока все поле не сохранено
- Последний выделенный сегмент обрезается по ближайшей границе: например, для хранения данных размером в 11 страниц сегмент размером в 16 страниц обрезается до смежных сегментов размером в 8, 2 и 1 страницы ($11_{10} = 2^3 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 1 \square 1101_2$); сегменты размером в 1 и 4 страницы высвобождаются
- Для 4Кб-страницы и максимального размера сегмента в 8Мб, максимальный размер поля – 448Мб
- Менеджер больших объектов Starburst приспособлен для быстрой последовательной обработки таких данных как изображения, аудио и видео

Древовидное представление

- Многоуровневая директория: нет ограничений на число уровней
- Пример архитектуры: система хранения данных EXODUS [4]
- Чрезвычайно гибкая система управления большими объектами; добавление и удаление данных с любой позиции внутри объекта
- Скорость последовательной обработки данных невысока
- Каждый объект имеет уникальный идентификатор –
OID = *<номер страницы, номер слота>*
- Два типа объектов:
 - Маленькие объекты: помещаются на одной странице
 - Большие объекты: занимают несколько страниц, OID указывает на заголовок
- Два типа страниц:
 - Сегментированная страница: содержит маленькие объекты и заголовки больших объектов
 - Остальные страницы содержат части больших объектов (каждая из таких страниц соответствует только одному объекту)
- Маленький объект, превысивший размер страницы, автоматически преобразуется в большой объект

Древовидное представление

- Физическое представление объекта: В+-дерево с индексом по байтовым позициям внутри объекта
- Корень дерева: заголовок большого объекта
- Каждый внутренний узел: содержит пары *<смещение, указатель>* для каждого своего потомка
 - *Смещение*: максимальное число байт, содержащееся в поддереве, корнем которого является потомок
 - *Указатель*: адрес страницы

Смещение для крайнего правого потомка показывает размер части объекта, определяемого поддеревом, корнем которого является данный узел. Соответственно, в случае корня дерева смещение для крайнего правого потомка даст размер всего объекта.

Число пар *<смещение, указатель>* в узле – от k до $2k+1$ (т.е. узел как минимум наполовину заполнен), где k – параметр В+-дерева.

Внутренние узлы могут занимать не более одной страницы.

- Лист (узел на последнем уровне дерева): одна или несколько физически смежных страниц (количество страниц на лист задается системным параметром); содержит только данные; лист должен быть заполнен не менее чем на половину.

Древовидное представление

Пример:

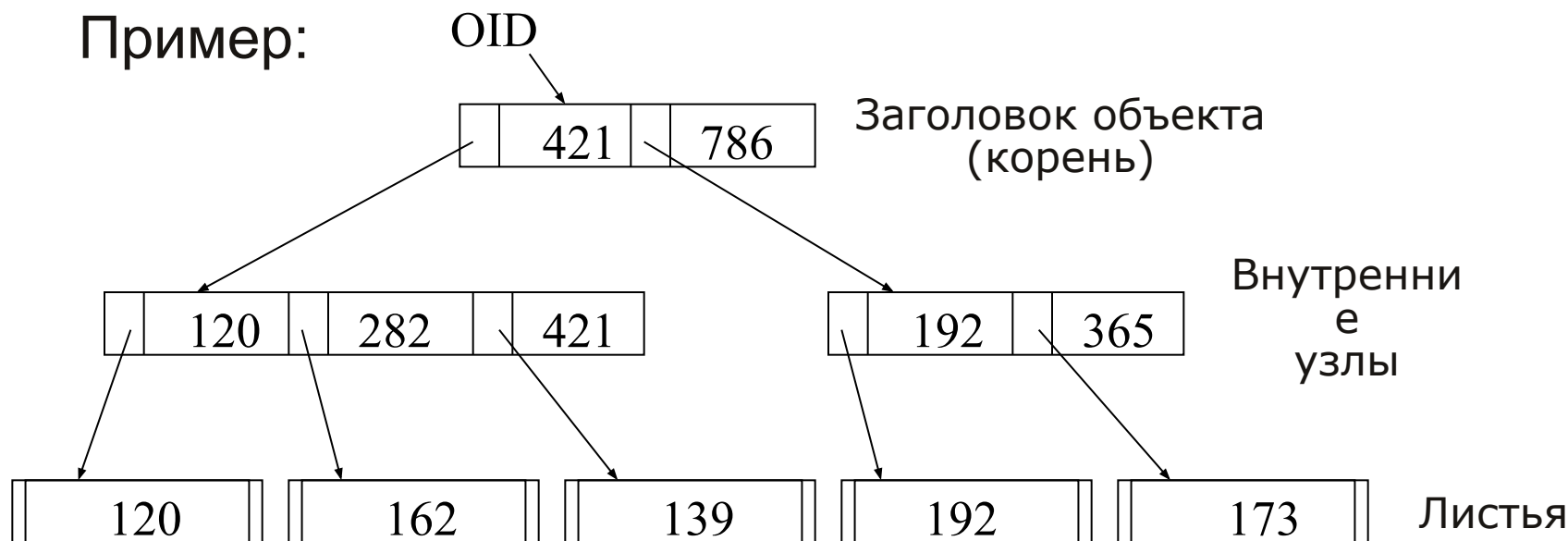


Рисунок взят из [4]

Левый узел содержит байты 1-421, правый узел – остаток объекта (байты 422-786). Крайний правый лист содержит 173 байта данных. 50-ый байт в этом листе является $192+50=242$ -ым байтом в крайнем правом узле и $421+242=663$ -им байтом в целом объекте.

Максимально возможные размеры объекта в случае 4Кб-страниц, 4-байтных указателей и смещений, и 4-х страничных листьев:

- Двухуровневое дерево: 8Мб
- Трехуровневое дерево: 4Гб

Древовидное представление

Обозначения:

- Смещения - $c[i]$, $c[0] = 0$; указатели - $p[i]$, $1 \leq i \leq 2k+1$

Поиск:

Извлечь N байт, начиная с позиции S

Алгоритм

1. Считываем страницу с корнем – P , присвоим: $start = S$.
2. До тех пор пока P не является листом выполняем следующее:
 - сохраняем адрес P в стеке;
 - находим наименьшее $c[i]$, такое что $start \leq c[i]$;
 - присваиваем: $start = start - c[i-1]$;
 - считываем страницу, соответствующую $p[i]$, которая становится P .
3. Достигнув листа, первый нужный байт находится на странице P на позиции $start$.
4. Для получения остальных N байт, путешествуем по дереву, используя стек из шага 2.

Демонстрация (см.рисунок на пред.слайде): допустим нужны байты 250-300. $start=250$, ищем наименьшее смещение – $c[1]=421$. Далее $start=250-c[0]=250$, по $p[1]$ считываем левый узел. Находим смещение – $c[2]=282$, $start=250-c[1]=130$. $p[2]$ ведет к листу с 162 байтами. Извлекаем байты 130-162. Остающиеся 18 считываем с листа-соседа справа (добираемся до данного листа с помощью стека).

Древовидное представление

Вставка:

Вставить N байт после позиции S

Алгоритм

1. Находим лист L , содержащий байт на позиции S , как было показано в предыдущем алгоритме. Во время движения по дереву обновить смещения, согласно ожидаемой вставке. Сохранить путь в стеке.
2. Если в L достаточно места для N байт, вставим их и завершим операцию.
3. Иначе, выделим достаточное число новых листьев и равномерно распределим старые байты листа L и N новых байт между листьями. Распространить новые смещения и указатели вверх по дереву с помощью стека. В случае если произойдет переполнение внутреннего узла, использовать тот же подход, что и при переполнении листа.

Замечание: коэффициент использования памяти можно улучшить если проверять правые и левые листья-соседи на наличие свободного места для вставляемых данных.

Древовидное представление

Добавление в конец (специальный случай вставки):

Добавить N байт в конец объекта

Алгоритм

1. Двигаемся по крайнему правому пути, прибавляя N к смещениям, и сохраняем путь в стеке.
2. Если в крайнем правом листе R достаточно места для N байт, добавим их и завершим операцию.
3. Иначе, считаем левого соседа R – лист L . Выделим достаточное число новых листьев, чтобы вместить содержимое листов R и L плюс новые N байт. Заполним все листья за исключением двух последних полностью, а два последних равномерно (таким образом, чтобы каждый из них был заполнен, по меньшей мере, наполовину). Распространить новые смещения и указатели вверх по дереву с помощью стека. Разрешать переполнения внутренних узлов также как и при вставке.

Замечание: преимущество данного алгоритма вставки в том, что он гарантирует наилучший коэффициент использования листьев в случаях, когда большие объекты создаются пошагово путем последовательных добавлений в конец (например, когда создаются сверх большие объекты).

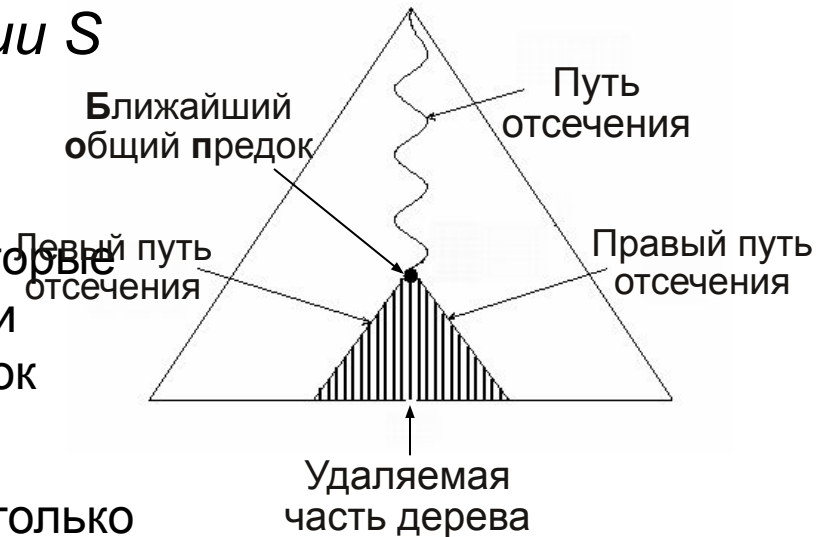
Древовидное представление

Удаление:

Удалить N байт, начиная с позиции S

Обозначения:

- Правый и левый путь отсечения – пути к первому и последнему байтам, которые нужно удалить. Узел в котором эти пути пересекаются – **ближайший общий предок** ('боп' далее).
- 'Незаполнение' узла может возникнуть только у узлов, лежащих на пути отсечения. Возможны два случая:
 - Лист заполнен менее чем наполовину
 - Внутренний узел имеет менее k узлов-потомков (двух для корневого узла)
- Для узла существует опасность незаполнения, если:
 - Узел не заполнен
 - Внутренний узел имеет k узлов-потомков (два для корня) и для узла-потомка, лежащего на пути отсечения, также существует опасность незаполнения
 - Узел 'боп' имеет $k+1$ узлов-потомков (три если это корень) и оба из его потомков на левом и правом путях отсечения в опасности



Древовидное представление

Алгоритм

Фаза удаления:

Двигаемся по дереву по левому и правому путям отсечения. Запоминаем узлы, лежащие на путях. Удаляем все поддеревья, содержащиеся целиком между левым и правым путям отсечения. Отражая удаление, обновляем смещения во всех узлах, лежащих на путях.

Фаза перебалансировки:

1. Если корневой узел не в опасности, перейти к шагу 2. Если у корня только один потомок, то делаем потомка корнем и переходим к шагу 1. Иначе, сливаем/перетасовываем те узлы-потомки, что находятся в опасности, и переходим к шагу 1.
2. Перейдем к следующему узлу-потомку, лежащему на пути отсечения. Если таких узлов не осталось, дерево перебалансировано.
3. До тех пор пока данный узел в опасности, сливаем/перетасовываем его с узлами-соседями (здесь потребуется 0, 1 или 2 итерации).
4. Перейдем к шагу 2.

Древовидное представление

Замечания:

- Представление данных в виде B+-деревьев довольно эффективно на практике:
 - Коэффициент использования памяти – около 70% в случае обычной вставки и около 80% в случае улучшенной вставки
 - Скорость поиска – десятки миллисекунд (в зависимости от скорости чтения данных на диске и буферизации)
- Контроль версий для больших объектов:
 - Одинаковые части различных версий могут использоваться совместно
 - Обновления не затрагивают старые версии объекта: изменяемые узлы копируются на новое место и обновляются
 - Старые версии объекта не могут быть обновлены, но удаление старых версий возможно: при этом необходимо избегать удаление узлов, которые используются другими версиями объекта (простейший способ: пометить узлы всех остальных версий, а затем удалить все непомяченные узлы)

Упражнения

1. В чем отличие B-дерева от B+-дерева?
2. Выполнить следующие операции с объектом на слайде 16:
 - Вставить 201 байт, начиная с позиции 200
 - (Вернувшись к начальному виду дерева) вставить 610 байт в конец объекта
 - Удалить байты на позициях 101-201
 - Удалить байты на позициях 280-501

Считаем при этом, что дерево имеет следующие параметры:

 - Каждый узел может иметь не более трех потомков ($k=3$)
 - Емкость листа – 256 байт

Ссылки на литературу

- [1] Chou et al. Design and Implementation of the Wisconsin Storage System. *Softw. Pract. and Exper.* 15(10), 1985
- [2] Lehman and Lindsay. The Starburst Long Field Manager. VLDB-1989, 1989
- [3] Д. Кнут. Искусство программирования. Том 1, глава 2, секция 5.2.
- [4] Carey et al. Object and File Management in the EXODUS Extensible Database System. VLDB-1986, 1986