

Основы построения файловых систем



Статистика Backblaze по поломкам HDD в 2022 году

Поломки среди наиболее многочисленных дисков составили:

Модель	Число дисков	% поломавшихся
HGST HMS5C4040BLE640	12730	0.41%
HGST HUH721212ALN604	10769	0.74%
WDC WUH721414ALE6L4	8410	0.12%
WDC WUH721816ALE6L4	10801	0.36%
Toshiba MG07ACA14TA	38182	1.01%
Toshiba MGO8ACA16TE	5936	1.57%
Seagate ST4000DM000	18246	3.45%
Seagate ST16000NMO01G	20393	0.86%

<https://www.backblaze.com/blog/backblaze-drive-stats-for-2022/>

Эксперимент в CERN о надёжности хранения данных

- Приложение пишет 1Gb данных на диск следующим образом:
 - Записать 1Mb,
 - Подождать 1с,
 - Повторить.
- Запускаем такое приложение на каждом из дисков на кластере из 3000 машин с HW RAID.
- Через 3 недели читаем содержимое файлов.

Эксперимент в CERN о надёжности хранения данных

- Приложение пишет 1Gb данных на диск следующим образом:
 - Записать 1Mb,
 - Подождать 1с,
 - Повторить.
- Запускаем такое приложение на каждом из дисков на кластере из 3000 машин с HW RAID.
- Через 3 недели читаем содержимое файлов.
- Нашлось примерно 150 одномогабайтных блоков с изменившимся содержимым, причём чтение из них завершалось «успешно» с точки зрения как оборудования, так и файловой системы.

Эксперимент в CERN о надёжности хранения данных

Выводы:

- Данные нельзя хранить в единственном экземпляре,
- Необходимы контрольные суммы для проверки целостности,
- Необходима активная фоновая проверка данных.
- Хранение реплик или использование Reed-Solomon,
- ZFS и btrfs хранят криптографические хеши всех записанных данных, ext4 хранит только CRC,
- Online scrubbing & repair в ZFS и btrfs или в HW RAID-контроллерах.

Обработка повреждений ФС в различных приложениях

В работе [1] данные следующих приложений располагали на ФС, случайно подменяющей содержимое блоков:

- Redis,
- ZooKeeper,
- Cassandra,
- Kafka,
- RethinkDB,
- LogCabin.

[1] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast17/fast17-ganesan.pdf>

[2] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast18/fast18-alagappan.pdf>

Обработка повреждений ФС в различных приложениях

В работе [1] данные следующих приложений располагали на ФС, случайно подменяющей содержимое блоков:

- Redis,
 - Не проверяет контрольные суммы пользовательских данных,
 - Как следствие, реплицирует некорректные данные между узлами,
 - Повреждения в ФС обрабатываются с помощью assert().
- ZooKeeper,
- Cassandra,
- Kafka,
- RethinkDB,
- LogCabin.

[1] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast17/fast17-ganesan.pdf>

[2] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast18/fast18-alagappan.pdf>

Обработка повреждений ФС в различных приложениях

В работе [1] данные следующих приложений располагали на ФС, случайно подменяющей содержимое блоков:

- Redis,
- ZooKeeper,
 - Проверяет наличие ошибки во всех данных, но делает это с помощью `assert()`,
 - Забыли рассмотреть случай, когда IO завершается неудачно и в заголовке транзакции, и в журнале,
 - Использует Adler32 для проверки целостности данных,
- Cassandra,
- Kafka,
- RethinkDB,
- LogCabin.

[1] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast17/fast17-ganesan.pdf>

[2] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast18/fast18-alagappan.pdf>

Обработка повреждений ФС в различных приложениях

В работе [1] данные следующих приложений располагали на ФС, случайно подменяющей содержимое блоков:

- Redis,
- ZooKeeper,
- Cassandra,
 - Забыли о контрольных суммах для несжатых данных,
 - При несоответствии данных и контрольной суммы выбирает последнюю запись как правильную, поэтому может распространять повреждения между репликами,
- Kafka,
- RethinkDB,
- LogCabin.

[1] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast17/fast17-ganesan.pdf>

[2] <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast18/fast18-alagappan.pdf>

Способы проверки целостности данных

У нас упоминались два инструмента для проверки целостности данных:

- Cyclic redundancy checks,
- Криптографические хеш-суммы.

Обсудим их детальнее.

Cyclic Redundancy Check

Рассмотрим сообщение как последовательность битов (элементов $GF(2)$) и сопоставим ему многочлен из $GF(2)[X]$:

$$a_{n-1}a_{n-2} \dots a_0 \rightsquigarrow M(X) = X^n + a_{n-1}X^{n-1} + a_{n-2}X^{n-2} + \dots + a_0$$

Возьмём многочлен $C \in GF(2)[X]$ степени d , посчитаем $r(X)$ – остаток от деления $M(X) * X^d$ на $C(X)$.

$r(X)$ называется CRC сообщения M .

Теперь построим многочлен

$$M(X) * X^d + r(X)$$

Ему соответствует сообщение $a_{n-1}a_{n-2} \dots a_0$, к которому дописали биты, равные коэффициентам r (внимание: r может быть степени меньше m , тогда считаем коэффициенты при старших степенях нулями).

CRC очень хорошо приспособлены для аппаратной реализации: из арифметических операций нужен только XOR.

Многочлен $C(X)$ подбирается так, чтобы обеспечить обнаружение определённых типов ошибок.

Ошибки, которые находит CRC (упражнения)

- Если $C(X)$ имеет два и более ненулевых коэффициентов, то он определяет любую ошибку, изменяющую только один бит.
- Если в разложении $C(X)$ на неприводимые множители есть многочлен степени m , то $C(X)$ определяет любую ошибку, изменяющую только два бита, расположенных на расстоянии, меньшем m .
- Если $C(X)$ делится на $X+1$, то он определяет любую ошибку, меняющую нечётное число бит.

Cyclic Redundancy Check

Типичная схема применения CRC:

```
struct something
{
    some fields
    ...
    u64 crc;
}
```

1. Вычислить CRC всех полей структуры, кроме `something->crc`,
2. Записать в `something->crc` такое значение, чтобы CRC от всей структуры равнялся нулю.

Упражнение: пусть дано сообщение M и порождающий многочлен $C(X)$ степени d . Найти целое d -битовое число X такое, что $CRC(\text{concat}(M, X)) = 0$.

Примеры CRC

Название	Где применяется	Порождающий многочлен*
CRC-16-CCITT	Bluetooth	0x1021
CRC-16-IBM	USB	0x8005
CRC-32	Ethernet, SATA, MPEG-2, gzip, bzip2, PNG	0x04C11DB7
CRC-32C (Castagnoli)	iSCSI, SCTP, SSE4.2, btrfs, ext4, Ceph	0x1EDC6F41

** Отдельные биты числа рассматриваются как коэффициенты порождающего многочлена.*

Криптографические хеши

CRC очень просты в вычислении и обнаруживают простые ошибки. Но их легко обмануть намеренными ошибками.

- Redis,
- ZooKeeper,
 - Проверяет наличие ошибки во всех данных, но делает это с помощью `assert()`,
 - Забыли рассмотреть случай, когда IO завершается неудачно и в заголовке транзакции, и в журнале,
 - Использует **Adler32** для проверки целостности данных,
- Cassandra,
- Kafka,
- RethinkDB,
- LogCabin.

Adler32 построен для определения ошибок архиваторов и годится только для коротких строк. Проверка больших блоков в ZooKeeper из-за этого ненадёжна и ZooKeeper может возвращать повреждённые данные.

Криптографические хеши

CRC очень просты в вычислении и обнаруживают простые ошибки. Но их легко обмануть намеренными ошибками.

Для надёжной проверки того, что блок данных не был повреждён или изменён, применяются криптографические хеши:

- MD5,
- SHA1, SHA-256, SHA-384, SHA-512.

На них полагаются, поскольку сейчас не известно алгоритмов поиска коллизий этих хешей, кроме перебора:

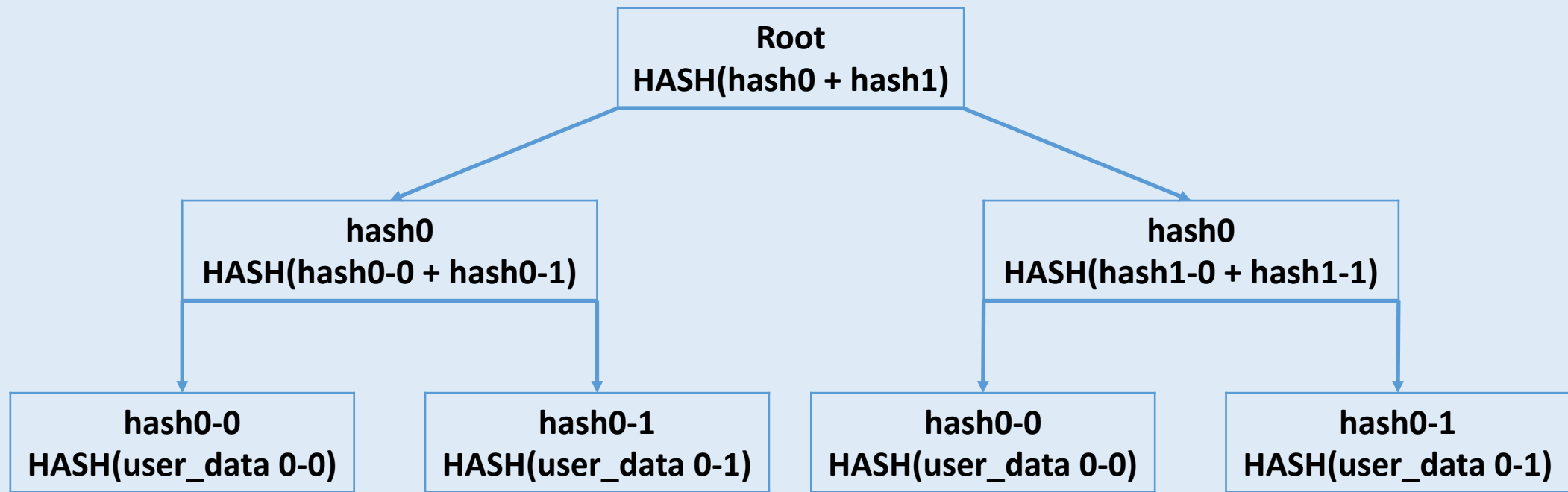
- Для MD5 и SHA1 – большого числа вариантов,
- Для SHA-256 и старше – полного перебора.

Примерная скорость вычисления хешей и CRC*

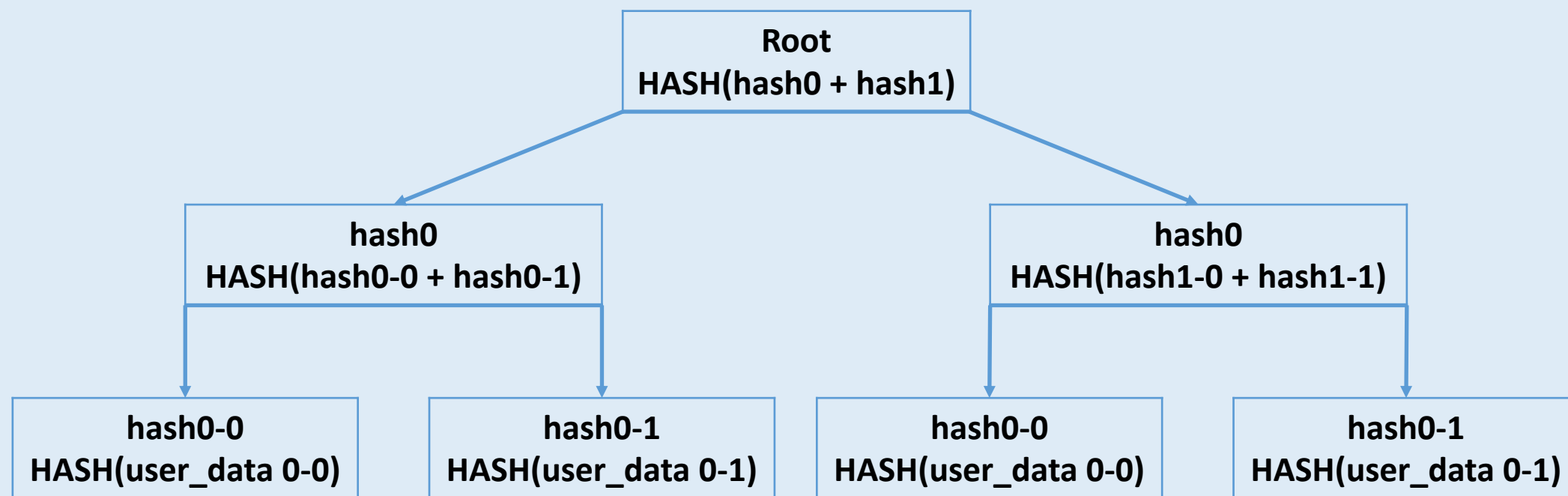
Алгоритм	GB/sec	Cycles/byte
CRC32	11.0	0.22
MD5	9.7	0.25
SHA-1	5.4	0.45
SHA-512	2.2	1.08

* Данные для реализаций из ISA-L на Xeon 8180 (Neon City)

Пример проверки целостности дерева: Merkle trees



Пример проверки целостности дерева: Merkle trees



Применения:

- проверка целостности структуры дерева каталогов и дерева экстендов (ZFS, btrfs),
- проверка подлинности данных в p2p-сетях,
- быстрое определение частей деревьев, подлежащих синхронизации в распределённой БД (например, DynamoDB).

RAID – Redundant Array of Independent (Inexpensive) Disks

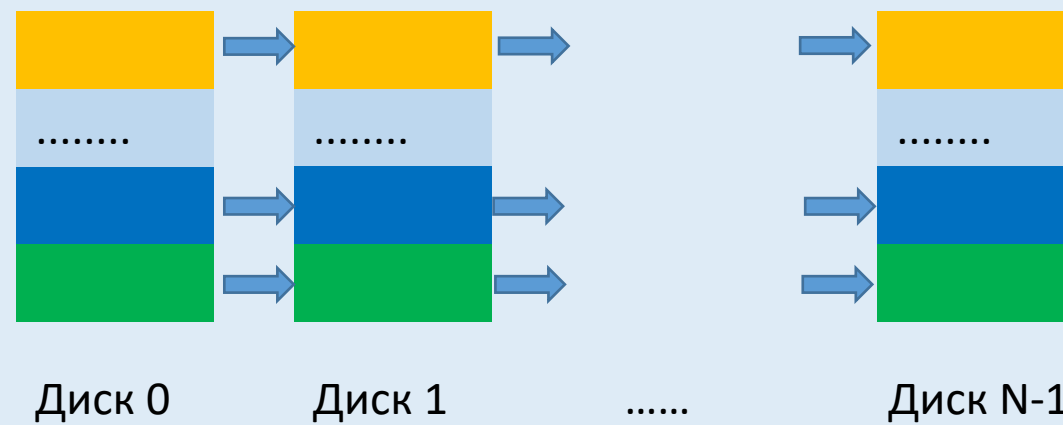
Для чего нужен:

- Большая надёжность, чем у отдельных дисков,
- Большая вместимость, чем у отдельных дисков.

Уровни RAID

RAID0 (stipe)

Данные разрезаются на последовательные куски длины $N * B$, каждый кусок разделяется на N частей, которые записываются на различные диски:



Уровни RAID

RAID1 (mirror)

Каждый диск в массиве содержит одни и те же данные:

.....

Диск 0

==

.....

Диск 1

==

.....

==

.....

Диск N-1

Уровни RAID

RAID4

Массив состоит из N+1 дисков. На первых N дисках данные хранятся, как на RAID0. На последнем диске каждый блок вычисляется как XOR соответствующих блоков на N дисках.

.....

b10

b00

→

.....

b11

b01

→

.....

.....

b10 + b11 + ...

b00 + b01 + ...

Диск 0

Диск 1

.....

Диск N

При потере любого диска массив остаётся работоспособным.

Уровни RAID

RAID4	<p>Массив состоит из N+1 дисков. На первых N дисках данные хранятся, как на RAID0. На последнем диске каждый блок вычисляется как XOR соответствующих блоков на N дисках.</p> <div><div><div></div><div>.....</div><div>b10</div><div>b00</div></div><div>→</div><div><div></div><div>.....</div><div>b11</div><div>b01</div></div><div>→</div><div>.....</div><div><div></div><div>.....</div><div>b10 + b11 + ...</div><div>b00 + b01 + ...</div></div></div> <div><div>Диск 0</div><div>Диск 1</div><div>.....</div><div>Диск N</div></div> <p>При потере любого диска массив остаётся работоспособным.</p> <p>Такой массив имеет концептуальный недостаток: диск с блоками чётности будет изнашиваться быстрее других дисков.</p>
-------	---

Уровни RAID

RAID5	<p>Массив строится так же, как и RAID4, но блоки чётности в разных страйпах хранятся на разных дисках:</p> <div><div><div></div><div>.....</div><div>b20</div><div>b10 + b11</div><div>b00</div></div><div><div></div><div>.....</div><div>b20 + b21</div><div>b10</div><div>b01</div></div><div><div></div><div>.....</div><div>b21</div><div>b11</div><div>b00 + b01</div></div></div>
-------	--

Write holes

Запись на разные диски будет происходить в разное время.

Рассмотрим такой сценарий:

1. начинается запись на RAID1,
2. диск #0 обработал запрос на запись сектора,
3. произошёл сбой питания,
4. на диске #1 сектор остался без изменений.

Write holes

Аппаратный способ решения:

- BBU (Battery Backup Unit) в RAID-контроллерах.

Программные способы решения:

- write intent bitmap (linux md),
- checksumming + COW (ZFS),
- SSD journal: <https://lwn.net/Articles/665299/> .

Write intent bitmap, помимо исправления write holes, позволяет уменьшить время проверки и перестроения массива после аварийного выключения.

Ещё одна проблема RAID5

Восстановление данных занимает достаточно долго времени*, притом в течение всего этого промежутка на оставшиеся диски создаётся высокая нагрузка, что повышает вероятность выхода из строя ещё одного диска во время перестроения RAID5.

В практике наблюдалось достаточно количество ситуаций, когда во время перестроения массива отказывал второй диск. По этой причине на больших массивах от RAID5 отказались в пользу RAID6, разрешающего терять произвольные два диска.

** Перезаписать диск 10Tb на скорости 100Mb/sec займёт порядка полутора суток.*

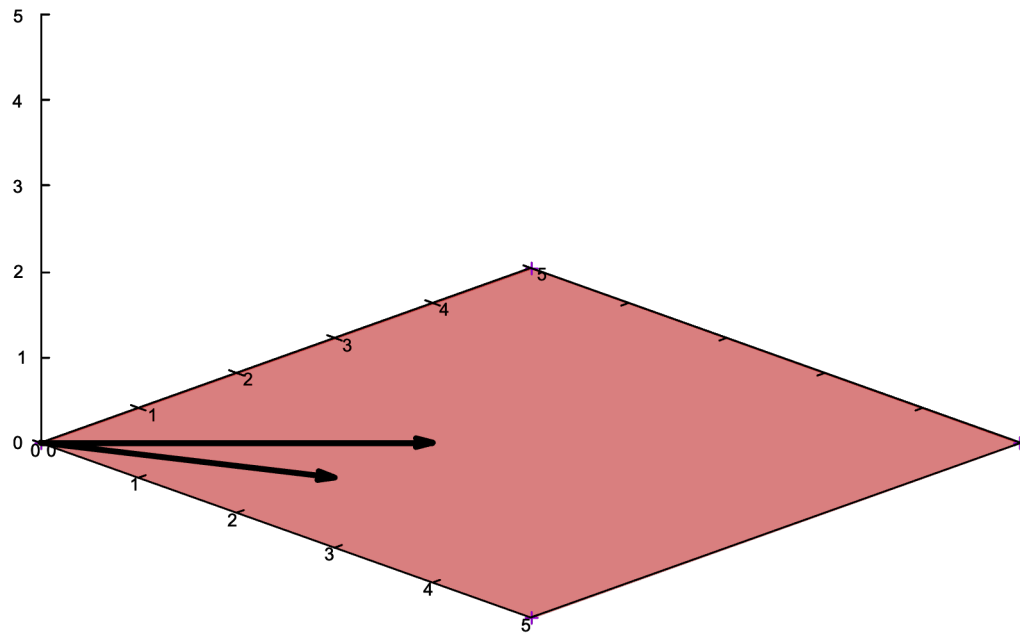
RAID6 и коды Рида-Соломона

RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.

RAID6 и коды Рида-Соломона

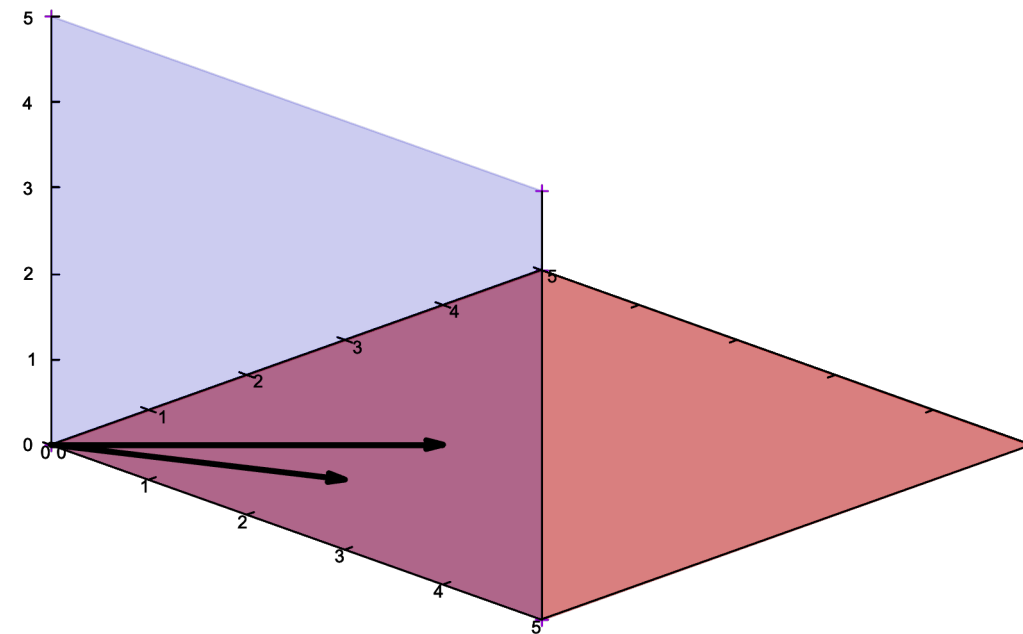
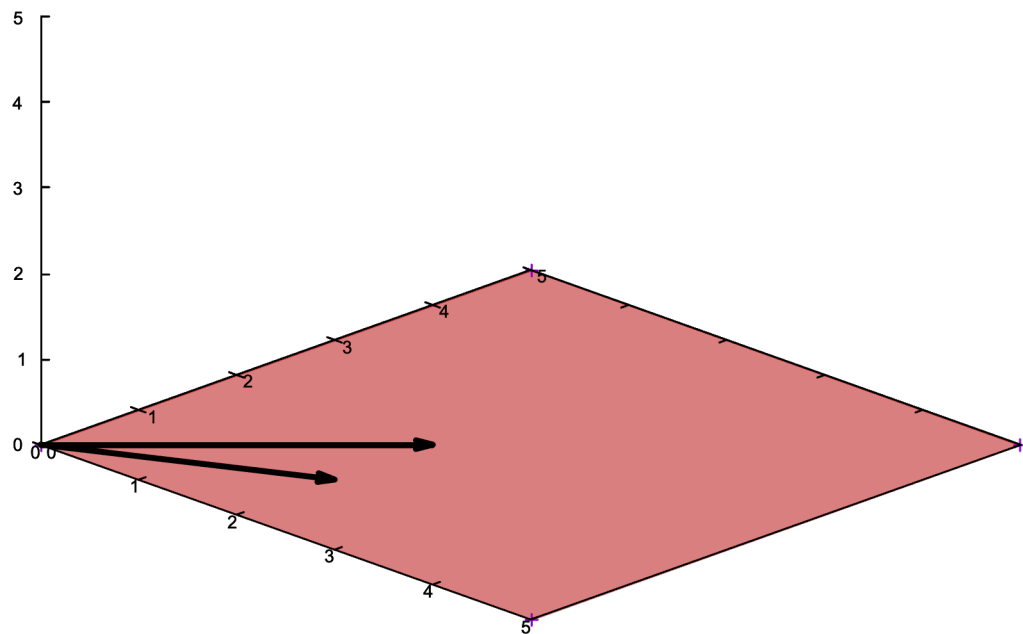
Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.



RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.

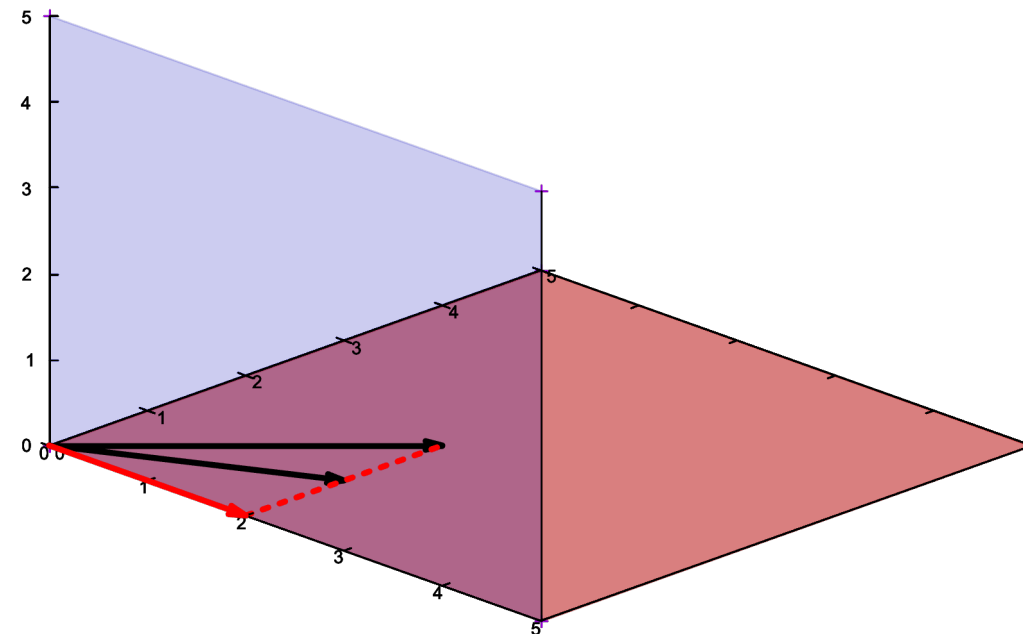
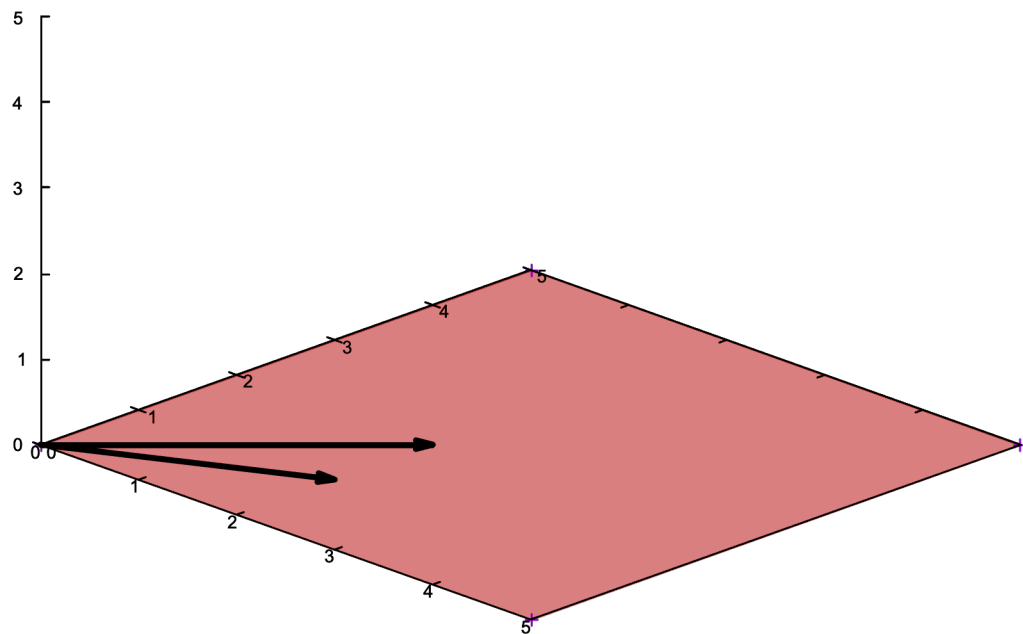
Потерю диска, хранящего "у-координату сообщения", можно рассматривать как проекцию на плоскость $\{y = 0\}$.



RAID6 и коды Рида-Соломона

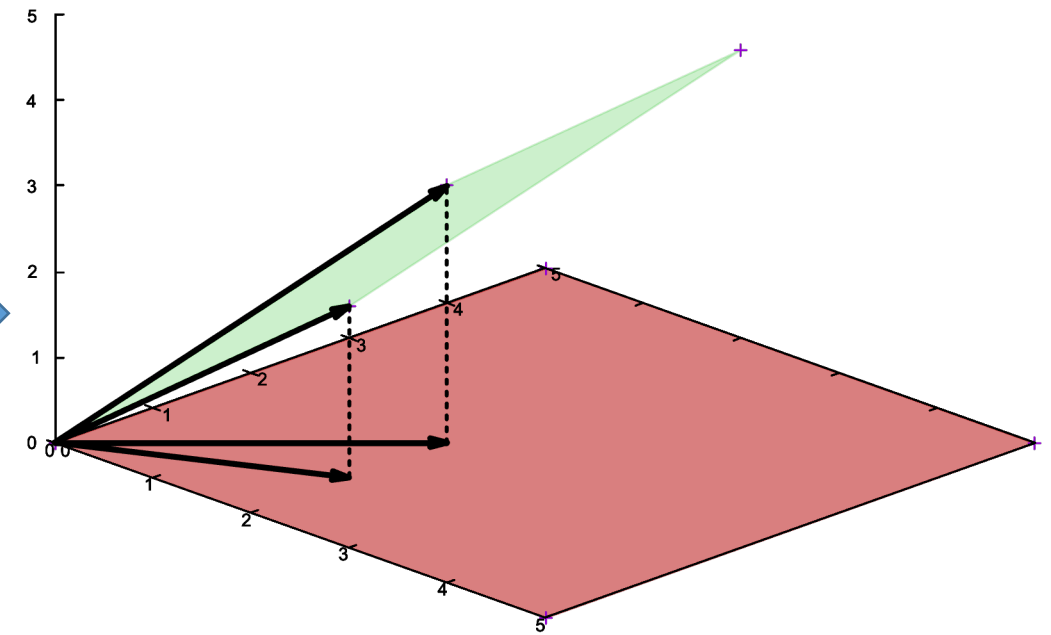
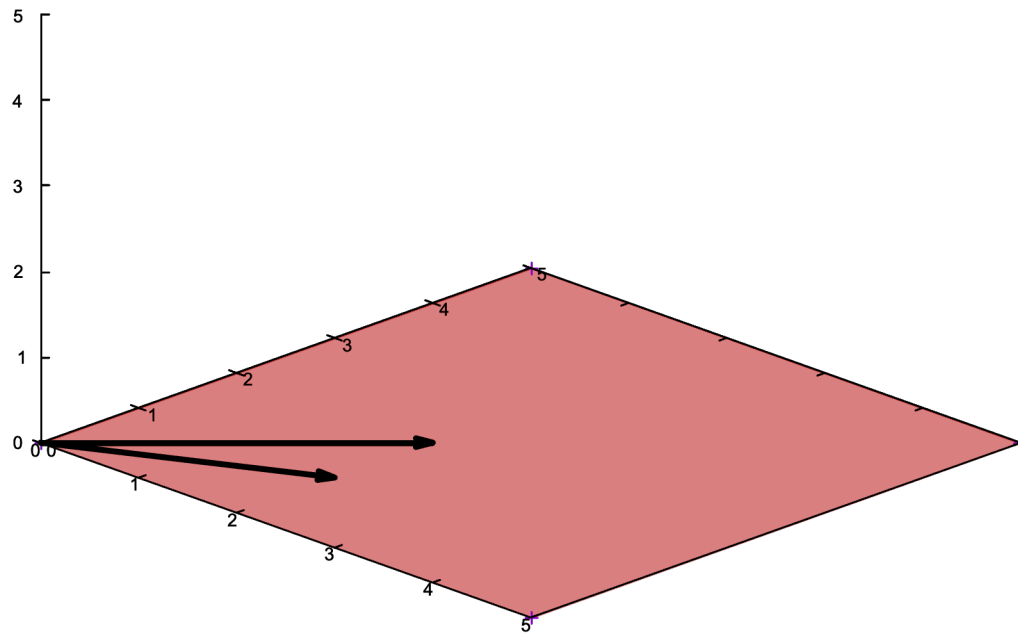
Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.

Потерю диска, хранящего "у-координату сообщения", можно рассматривать как проекцию на плоскость $\{y = 0\}$.



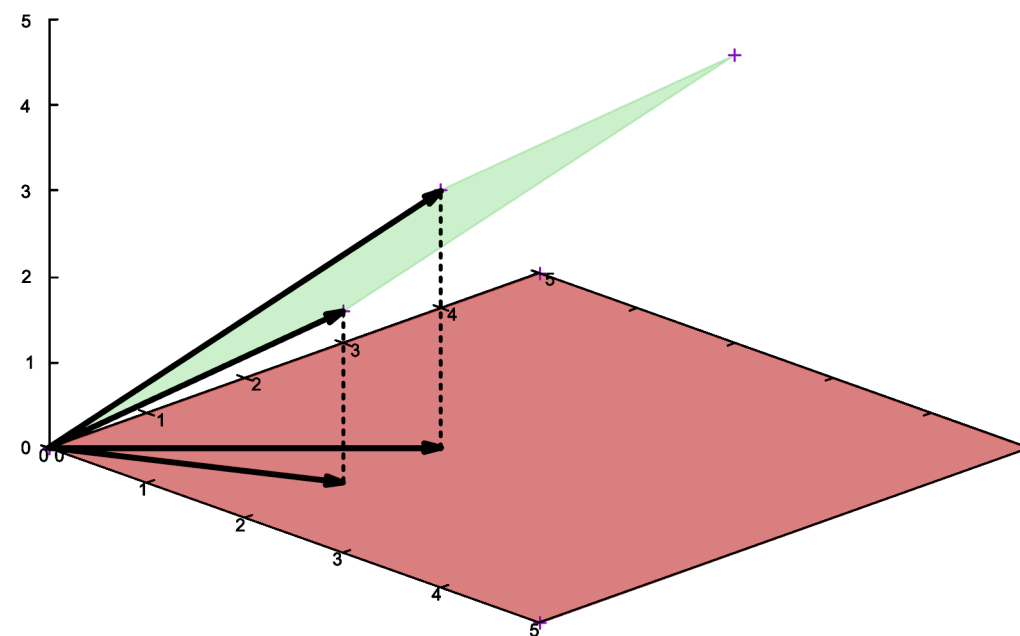
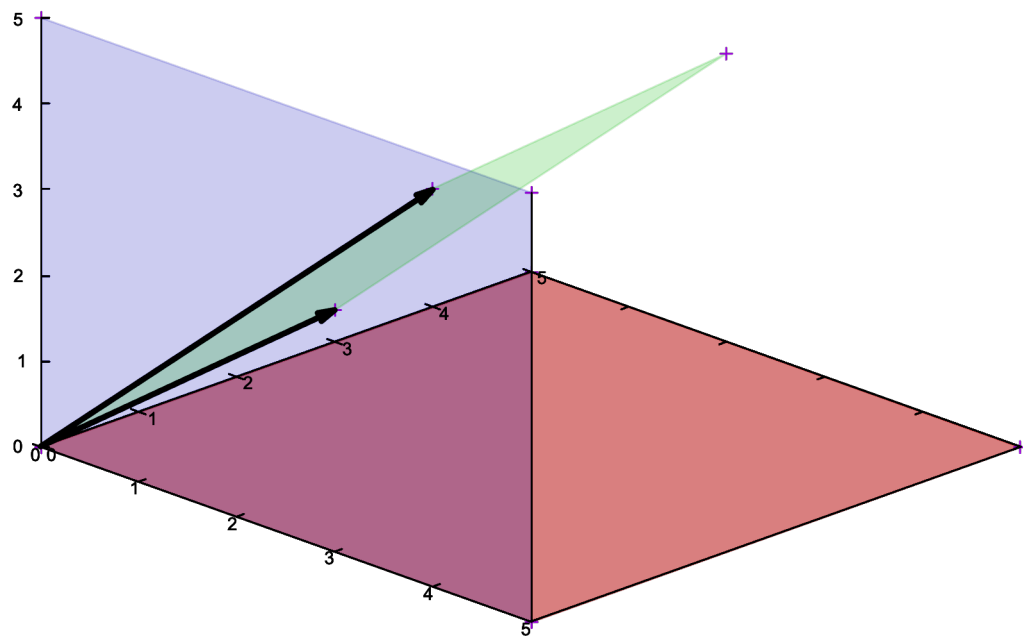
RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.



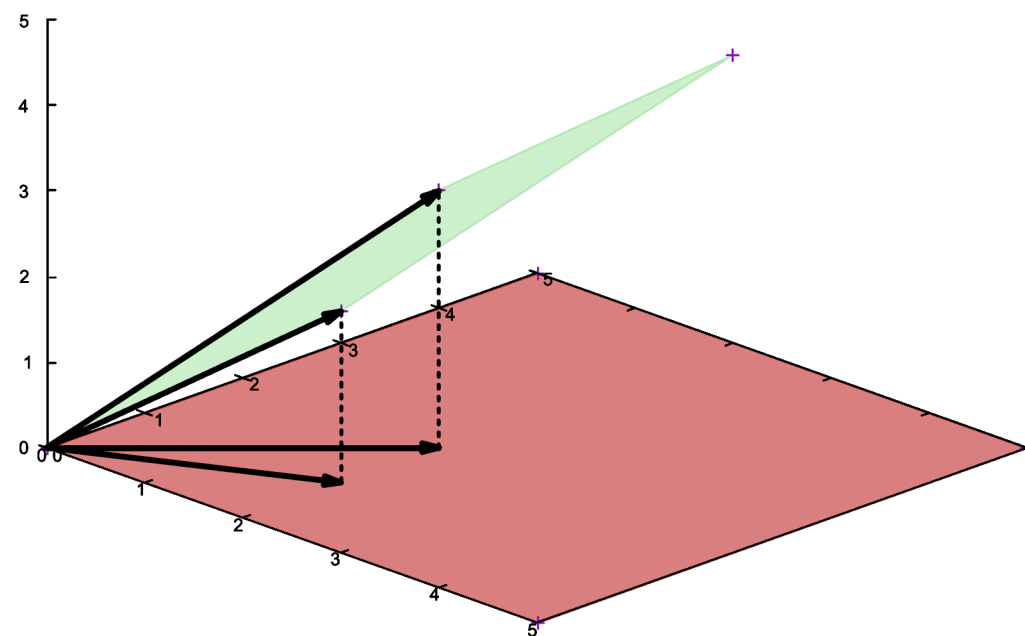
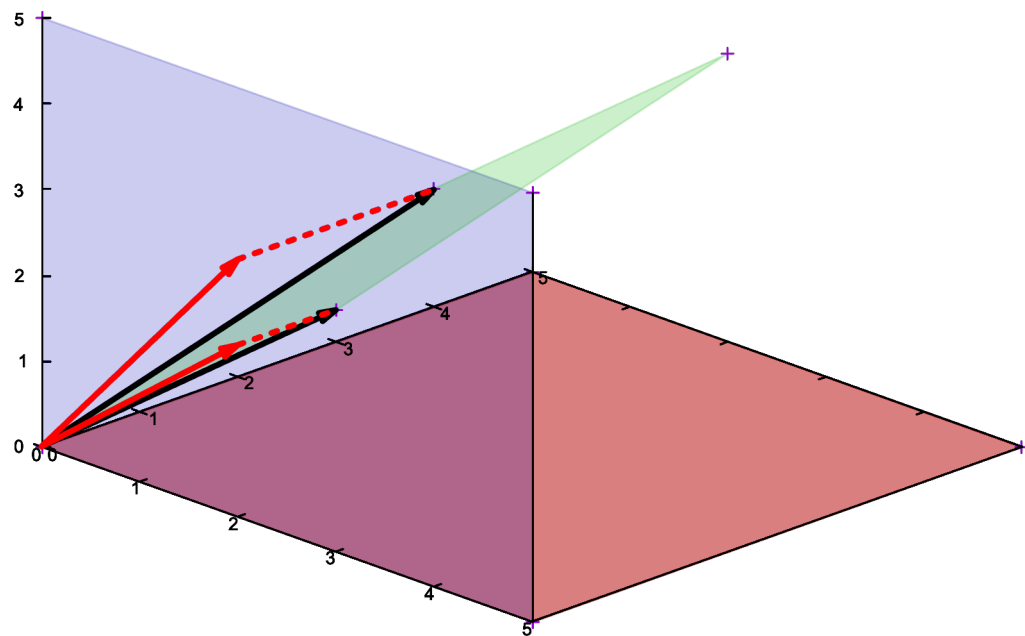
RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.



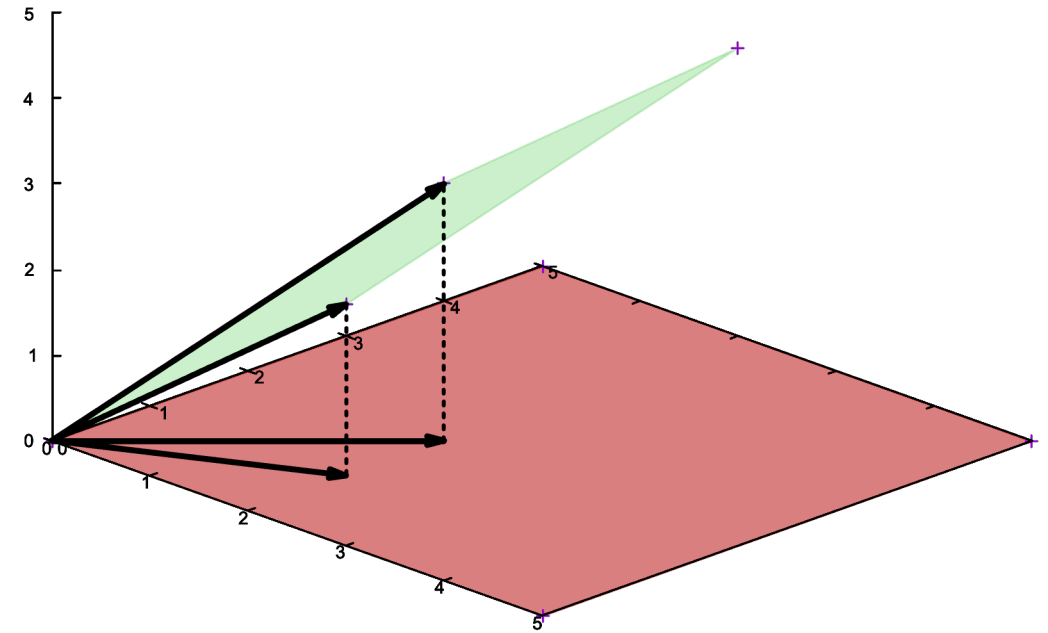
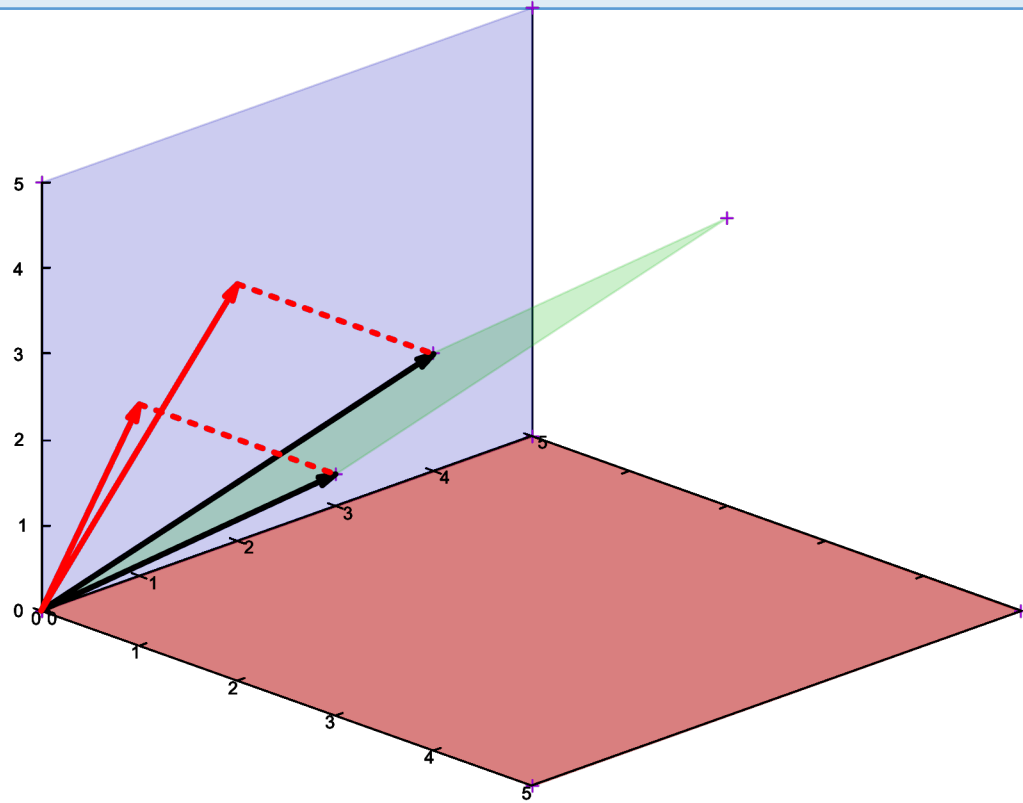
RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.



RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.



RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.

RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.

Выберем вложение $\varphi: k^n \hookrightarrow k^{n+m}$, образ которого пересекается с каждой t -мерной координатной плоскостью только по нулю.

Замена сообщения x длиной n байт на $\varphi(x)$ даёт нам сообщение длиной $n + t$ байт, которое обладает следующим свойством: по любым n компонентам $\varphi(x)$ можно однозначно восстановить x .

RAID6 и коды Рида-Соломона

Сообщение из n байт можно рассматривать как элемент n -мерного векторного пространства над полем $k = GF(256)$.

Выберем вложение $\varphi: k^n \hookrightarrow k^{n+m}$, образ которого пересекается с каждой t -мерной координатной плоскостью только по нулю.

Замена сообщения x длиной n байт на $\varphi(x)$ даёт нам сообщение длиной $n + t$ байт, которое обладает следующим свойством: по любым n компонентам $\varphi(x)$ можно однозначно восстановить x .

На практике φ выбирается так, чтобы первые n координат $\varphi(x)$ совпадали с x .

RAID6 и коды Рида-Соломона

Выберем вложение $\varphi: k^n \hookrightarrow k^{n+m}$, образ которого пересекается с каждой m -мерной координатной плоскостью только по нулю.

Замена сообщения x длиной n байт на $\varphi(x)$ даёт нам сообщение длиной $n + m$ байт, которое обладает следующим свойством: по любым n компонентам $\varphi(x)$ можно однозначно восстановить x .

Как доказать существование таких вложений $\varphi: k^n \hookrightarrow k^{n+m}$?

1. Пусть поле k содержит q элементов. Покажите, что количество наборов из n линейно независимых векторов в k^{n+m} равно

$$(q^{n+m} - 1) \cdot (q^{n+m} - q) \cdot \dots \cdot (q^{n+m} - q^{n-1})$$

2. Пусть $GL_k(n)$ -- группа невырожденных $n \times n$ -матриц с коэффициентами из k . Покажите, что количество элементов в ней равно

$$(q^n - 1) \cdot (q^n - q) \cdot \dots \cdot (q^n - q^{n-1})$$

3. Покажите, что число n -мерных подпространств в k^{m+n} равно

$$s(n, n + m) = \frac{(q^{n+m} - 1) \cdot (q^{n+m} - q) \cdot \dots \cdot (q^{n+m} - q^{n-1})}{(q^n - 1) \cdot (q^n - q) \cdot \dots \cdot (q^n - q^{n-1})}$$

4. Покажите, что количество n -мерных подпространств в k^{m+n} , которые содержат хотя бы одну координатную ось, много меньше числа $s(n, n + m)$.

Проблемы RAID6

Пусть мы храним данные, используя код Рида-Соломона $RS(n, n + m)$, т.е. храним m избыточных страниц на каждые n страниц пользовательских данных.

Проблемы RAID6

Пусть мы храним данные, используя код Рида-Соломона $RS(n, n + m)$, т.е. храним m избыточных страниц на каждые n страниц пользовательских данных.

1. Tail latency:

- Для того, чтобы прочесть n последовательных страниц данных, надо обратиться к n разным дискам (или n разным узлам кластера).

Проблемы RAID6

Пусть мы храним данные, используя код Рида-Соломона $RS(n, n + m)$, т.е. храним m избыточных страниц на каждые n страниц пользовательских данных.

1. Tail latency:

- Для того, чтобы прочесть n последовательных страниц данных, надо обратиться к n разным дискам (или n разным узлам кластера).
- Страницы можно делать большего размера, чтобы большинство запросов на чтение можно было исполнить с одного диска.
- Можно запрашивать чтения с дисков с избыточными данными и восстанавливать пользовательские страницы, будто медленные диски были потеряны.

Проблемы RAID6

Пусть мы храним данные, используя код Рида-Соломона $RS(n, n + m)$, т.е. храним m избыточных страниц на каждые n страниц пользовательских данных.

1. Tail latency:

- Для того, чтобы прочесть n последовательных страниц данных, надо обратиться к n разным дискам (или n разным узлам кластера).
- При записи надо дождаться ответа от $n + m$ дисков.

Проблемы RAID6

Пусть мы храним данные, используя код Рида-Соломона $RS(n, n + m)$, т.е. храним m избыточных страниц на каждые n страниц пользовательских данных.

1. Tail latency:

- Для того, чтобы прочесть n последовательных страниц данных, надо обратиться к n разным дискам (или n разным узлам кластера).
- При записи надо дождаться ответа от $n + m$ дисков.
- Можно использовать схему $RS(n, n + m + k)$ и не дожидаться записи на k дисков, считая данные на медленных дисках потерянными.

Проблемы RAID6

Пусть мы храним данные, используя код Рида-Соломона $RS(n, n + m)$, т.е. храним m избыточных страниц на каждые n страниц пользовательских данных.

1. Tail latency:

- Для того, чтобы прочесть n последовательных страниц данных, надо обратиться к n разным дискам (или n разным узлам кластера).
- При записи надо дождаться ответа от $n + m$ дисков.

2. Read amplification при восстановлении утерянных страниц:

- чтобы восстановить 1 страницу, необходимо прочесть n страниц.

Проблемы RAID6

Пусть мы храним данные, используя код Рида-Соломона $RS(n, n + m)$, т.е. храним m избыточных страниц на каждые n страниц пользовательских данных.

1. Tail latency:

- Для того, чтобы прочесть n последовательных страниц данных, надо обратиться к n разным дискам (или n разным узлам кластера).
- При записи надо дождаться ответа от $n + m$ дисков.

2. Read amplification при восстановлении утерянных страниц:

- чтобы восстановить 1 страницу, необходимо прочесть n страниц.
- Есть класс MSR-кодов (Minimum Storage Regenerating), которые минимизируют трафик репликации. См. Clay Codes: Moulding MDS Codes to Yield an MSR Code <https://www.usenix.org/system/files/conference/fast18/fast18-vajha.pdf>

Модель ошибок в RAID6

Напоминание: RAID6, как и RAID5, предполагает, что поломка диска проявляется как явная ошибка при попытке чтения. В этом случае мы понимаем, что надо восстановить данные, используя доступные диски. RAID6 никак не защищает от bit rot, т.е. ситуации, когда диск успешно выполняет чтение, но возвращает мусор.

Использование RAID6 не отменяет необходимости контроля целостности данных на дисках.