

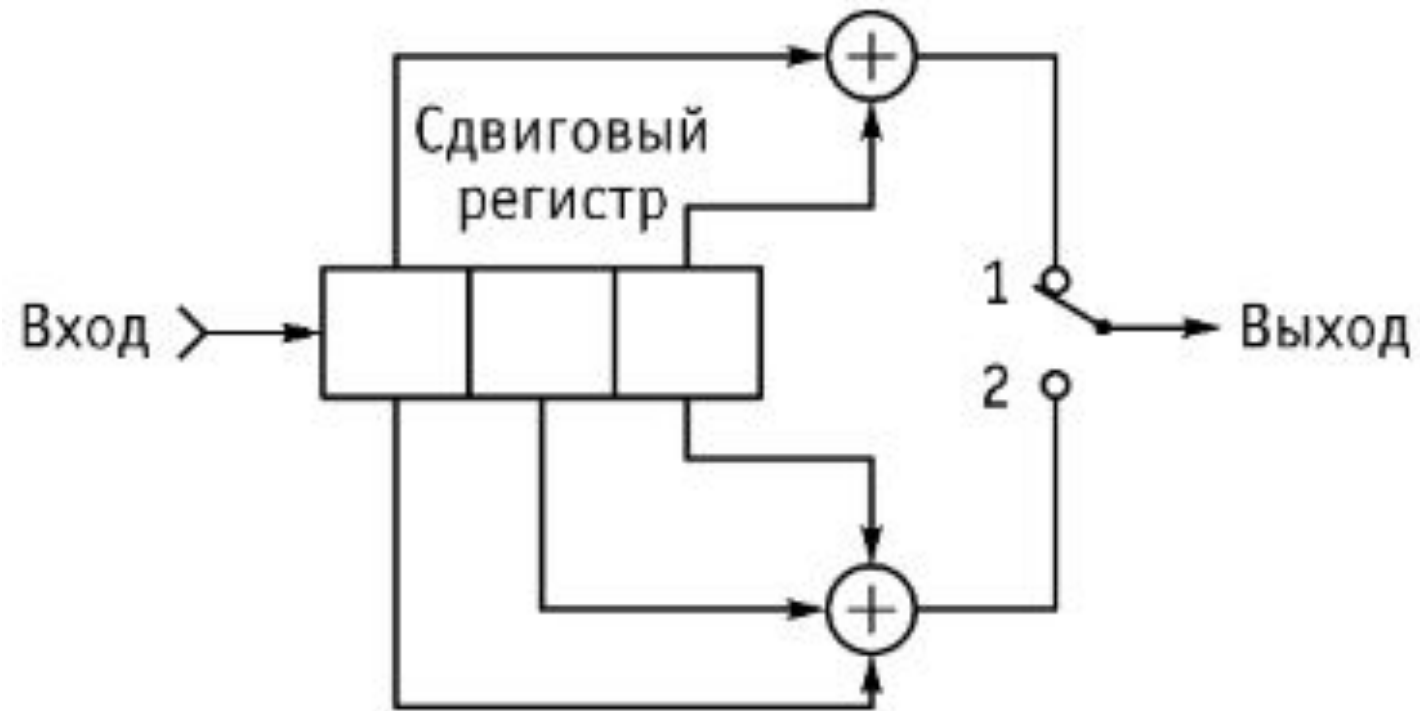
Сверточные коды

Другой класс корректирующих кодов, используемых в современном цифровом телевидении, – **это сверточные коды**, основанные на преобразовании входной бесконечной последовательности двоичных символов в выходную бесконечную последовательность двоичных символов, в которой на каждый символ входной последовательности приходится более одного символа.

Увеличение количества передаваемых двоичных символов при использовании сверточных кодов характеризуется **относительной скоростью** кода, иногда называемой **просто скоростью кода**,

$$R = \frac{Q_{\text{ВХ}}}{Q_{\text{ВЫХ}}} = \frac{k}{n}$$

Где $Q_{\text{ВХ}}$ и $Q_{\text{ВЫХ}}$ — скорости передачи двоичных символов на входе и выходе кодера соответственно, k — число бит входной последовательности, преобразуемых в n бит выходной последовательности.



Сверточный кодер

Кодер содержит трехразрядный сдвиговый регистр, на вход которого поступает входная последовательность двоичных СИМВОЛОВ.

На каждый такт биты в ячейках регистра сдвигаются на шаг вправо, причем очередной бит входной последовательности записывается в первую слева ячейку, а бит из крайней справа ячейки выбрасывается.

Выходы разрядов регистра подключены к входам двух сумматоров по модулю 2.

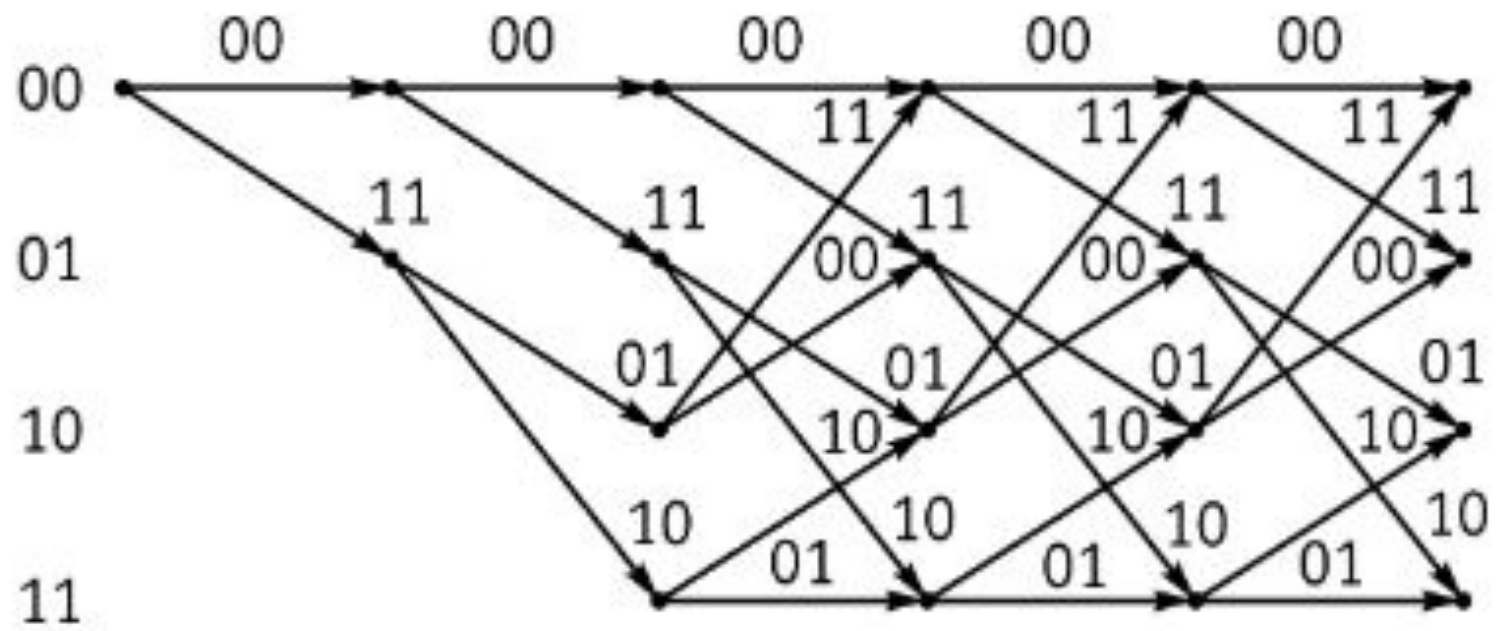
Выходная последовательность двоичных символов формируется с помощью коммутатора, который на каждый такт входной последовательности сначала передает на выход бит с верхнего сумматора (точка 1), а потом – бит с нижнего сумматора (точка 2).

Таким образом, на каждый бит входной последовательности формируются два бита выходной последовательности, то есть относительная скорость этого кода $R=1/2$.

Важный параметр сверточных кодов – кодовое ограничение, обозначаемое K .

Этот параметр показывает, сколько групп по k бит содержится в сдвиговом регистре и, следовательно, одновременно участвует в формировании бит выходной последовательности.

В рассматриваемом примере $k=1$, $K=3$.



Решетчатая диаграмма сверточного кода

Работа сверточного кодера поясняется решетчатой диаграммой.

Каждый двоичный символ входной последовательности преобразуется в пару двоичных символов выходной последовательности, определяемую двоичным символом входной последовательности и текущим состоянием кодирующего устройства.

Таких состояний может быть четыре: 00, 01, 10 и 11.

Каждому состоянию соответствует горизонтальный ряд узлов на диаграмме.

Из каждого узла, соответствующего текущему состоянию, выходят две ветви.

Верхняя (на решетчатой диаграмме) ветвь соответствует двоичному символу «0» входной последовательности, а нижняя ветвь – двоичному символу «1».

Пара цифр у каждой ветви показывает пару двоичных символов выходной последовательности, формируемых при данном переходе кодирующего устройства из одного состояния в другое.

Полученная структура переходов кодирующего устройства образует решетку, поэтому такие коды часто называются **решетчатыми**.

Если входная последовательность состоит из одних нулей, то и выходная последовательность также содержит только нули. Пусть входная последовательность содержит один единичный бит, а остальные – равные нулю:

...0 0 1 0 0 0

С помощью структурной схемы кодера и решетчатой диаграммы построим выходную последовательность:

... 00 00 11 01 11 00 11

Эта последовательность содержит 5 единиц, поэтому **расстояние Хемминга** между ней и последовательностью из одних нулей равно 5.

Изучение свойств рассматриваемого сверточного кода показывает, что расстояние Хемминга между выходными последовательностями, получаемыми из различных входных последовательностей и не содержащими ошибок, оказывается не менее 5.

Расстояние между выходными последовательностями возрастает с уменьшением ***R*** и с увеличением ***K***.

Исправление пакетных ошибок

Внешнее кодирование и перемежение

В системе внешнего кодирования для защиты всех 188 байт транспортного пакета (включая байт синхронизации) используется код Рида-Соломона.

В процессе кодирования к этим 188 байтам добавляется 16 проверочных байт.

При декодировании на приемной стороне это позволяет исправлять до восьми ошибочных байт в пределах каждого кодового слова длиной 204 байта.

$\overline{\text{SYNC}}_1$ или SYNC_n 1 байт	Информационные данные 187 байт
---	-----------------------------------

$\overline{\text{SYNC}}_1$ или SYNC_n 1 байт	Информационные данные 187 байт	Проверочные данные 16 байт
---	-----------------------------------	----------------------------------

Формирование пакетов данных с защитой от ошибок с помощью внешнего кода Рида-Соломона RS (204, 188)

Внешнее перемежение осуществляется путем изменения порядка следования байт в пакетах, защищенных от ошибок.

В соответствии со схемой, (слайд 18), перемежение выполняется путем последовательного циклического подключения источника и получателя данных к двенадцати ветвям, причем за одно подключение в ветвь направляется и из ветви снимается 1 байт данных.

В одиннадцати ветвях включены регистры сдвига, содержащие разное количество ячеек (каждая ячейка хранит байт данных) и создающие увеличивающуюся от ветви к ветви задержку.

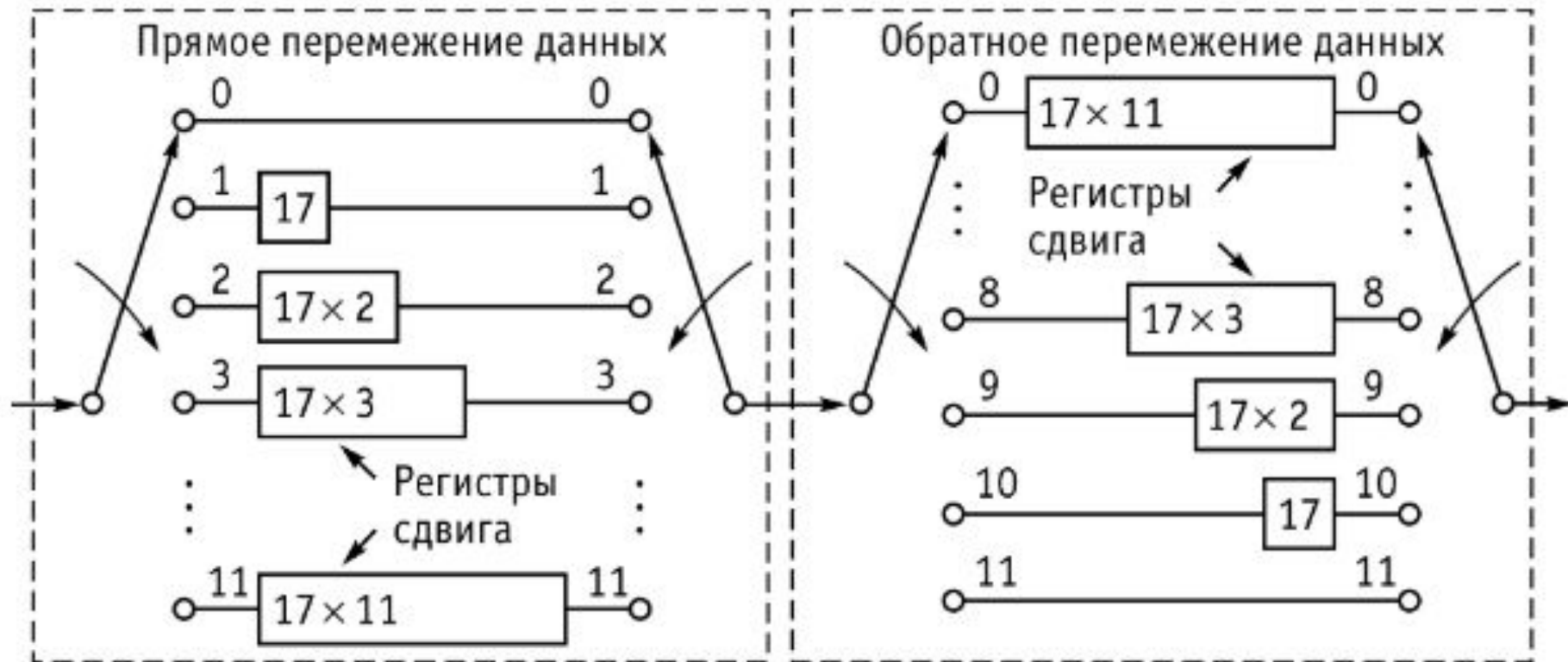
Входной и выходной ключи синхронизированы.

Предложенная схема не нарушает периодичность и порядок следования байт синхронизации.

Первый же синхробайт направляется в ветвь с номером 0, которая не вносит задержки.

После семнадцати циклов коммутации ключей через устройство пройдет 204 байта ($12 * 17 = 204$, что совпадает с длиной кодового слова, в которое превращается пакет данных после кодирования Рида-Соломона).

Следовательно, следующий байт синхронизации опять пройдет через ветвь с нулевой задержкой.



Структурная схема устройства внешнего перемежения данных

Перемежение является **временным перемешиванием байт данных**, в приемнике исходный порядок следования байт данных восстанавливается.

Полезным в перемежении является то, что длинные пакетные ошибки, обусловленные шумами и помехами в канале связи и искажающие последовательно идущие байты данных, в результате обратного перемежения в приемнике разбиваются на небольшие фрагменты и распределяются по разным кодовым словам кода Рида-Соломона.

В каждое кодовое слово попадает лишь малая часть пакетной ошибки, с которой легко справляется система обнаружения и исправления ошибок при сравнительно небольшом объеме проверочных данных.

Внутреннее кодирование

Внутреннее кодирование в системе вещания DVB-T основано на **сверточном коде**.

Оно принципиально отличается от внешнего, которое является представителем блочных кодов.

При блочном кодировании поток информационных символов делится на блоки фиксированной длины, к которым в процессе кодирования добавляется некоторое количество проверочных символов, причем каждый блок кодируется независимо от других.

При сверточном кодировании поток данных также разбивается на блоки, но гораздо меньшей длины, их называют **кадрами информационных символов**.

Обычно кадр включает в себя лишь несколько бит.

К каждому информационному кадру также добавляются проверочные символы, в результате чего образуются кадры кодового слова, но кодирование каждого кадра производится с учетом предыдущих информационных кадров.

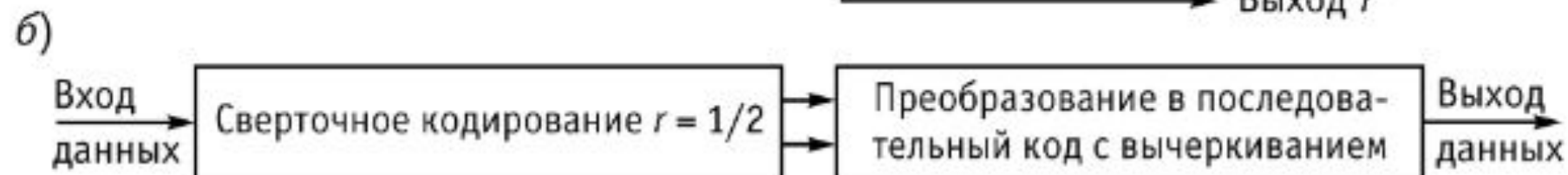
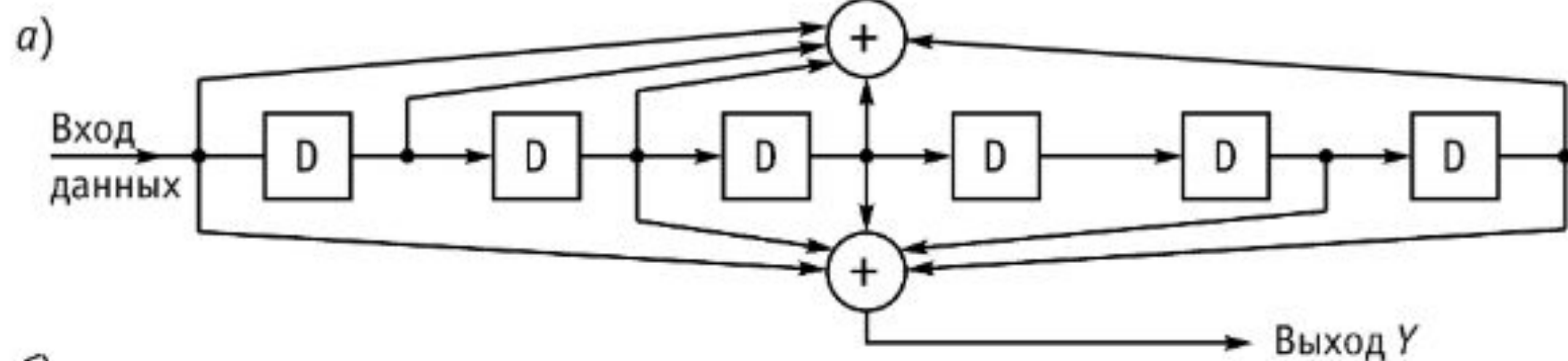
Для этого в кодере всегда хранится некоторое количество кадров информационных символов, доступных для кодирования очередного кадра кодового слова (количество информационных символов, используемых в процессе сверточного кодирования, часто называют **длиной кодового ограничения**).

Формирование кадра кодового слова сопровождается вводом следующего кадра информационных символов.

Таким образом, процесс кодирования связывает между собой последовательные кадры.

Скорость внутреннего кода, или отношение числа символов в информационном кадре к общему числу символов, передаваемых в одном кодовом кадре, может изменяться в соответствии с условиями передачи данных в канале связи и требованиями к скорости передачи данных.

Чем выше скорость кода, тем меньше его избыточность и тем меньше его способность исправлять ошибки в канале связи.



в)

r	Структура вычеркивания	Передаваемая последовательность
1/2	X: 1 Y: 1	$X_1 Y_1$
2/3	X: 10 Y: 11	$X_1 Y_1 Y_2$
3/4	X: 101 Y: 110	$X_1 Y_1 Y_2 X_3$
5/6	X: 10101 Y: 11010	$X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5$
7/8	X: 1000101 Y: 1111010	$X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5 Y_6 X_7$

Схема внутреннего кодирования:

а) структурная схема устройства сверточного кодирования со скоростью $R=1/2$;

б) кодирование с вычеркиванием;

в) таблица кодирования

В системе DVB-T внутреннее кодирование с изменяемой скоростью строится с использованием базового кодирования со скоростью $1/2$.

Основу базового кодера представляют собой два цифровых фильтра с конечной импульсной характеристикой, выходные сигналы которых X и Y формируются путем сложения по модулю двух сигналов, снятых с разных точек линии задержки в виде регистра сдвига из шести триггеров (слайд 24).

Входные данные последовательно вводятся в регистр сдвига, а из выходных сигналов фильтров после преобразования в последовательную форму создается цифровой поток, в котором биты следуют друг за другом в два раза чаще, чем на входе (скорость такого кода равна $1/2$, так как на каждый входной бит приходится два выходных).