

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2024-2-15-25

УДК 621.396.24

## ВЫБОР ТИПА ВНУТРЕННЕГО ПЕРЕМЕЖИТЕЛЯ ДЛЯ СВЁРТОЧНОГО ТУРБОКОДА (13,15)<sub>8</sub>

**Колобков Анатолий Владимирович**

кандидат технических наук, заместитель начальника центра инновационного развития  
АО «НПП «Полёт»

E-mail: [antvk@npp-polyot.ru](mailto:antvk@npp-polyot.ru)

**Хитева Дарья Вячеславовна**

научный сотрудник АО «НПП «Полёт»

E-mail: [geheimerater@yandex.ru](mailto:geheimerater@yandex.ru)

Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, Комсомольская площадь, д.1, ГСП-462

**Аннотация:** В работе рассматривается свёрточный турбокод (13,15)<sub>8</sub>, широко используемый в сетях радиосвязи. В разных сетях данный турбокод используется с разными схемами перемежения, что приводит к вопросу о выборе типа перемежителя. В статье рассмотрено влияние на помехоустойчивость системы связи со свёрточным турбокодом выбора типа перемежителя. Результаты анализа показывают, что среди детерминированных перемежителей наименьшее значение вероятности ошибки на бит обеспечивают перемежители, рекомендованные в стандартах LTE и UMTS. Продемонстрировано, что случайные перемежители способны улучшить помехоустойчивость системы связи, что зависит от правильности выбора типа перестановок. Гарантировать обеспечение высокой помехоустойчивости при выборе перестановок позволяет наложение ограничения на случайную последовательность в виде минимально возможного расстояния между соседними элементами после перемежения. Проведённое исследование показывает, что такие свойства перемежителя, как дисперсия и глубина перемежения, в целом могут спрогнозировать его эффективность при работе турбокода.

**Ключевые слова:** детерминированный перемежитель, псевдослучайный перемежитель, свёрточный турбокод, помехоустойчивость, дисперсия перемежения, глубина перемежения.

### Введение

Турбокоды нашли широкое применение в различных сетях цифровой радиосвязи [1]. Важным компонентом турбокода, позволяющим обеспечить высокую исправляющую способность при низких отношениях сигнал/шум за счёт увеличения общего кодового расстояния и уменьшения корреляции между соседними символами кодового слова при итеративном декодировании, является перемежитель.

По организации буфера для осуществления перестановки перемежители делят на блочные и свёрточные. По типам перестановки блочные перемежители делят на случайные, псевдослучайные и детерминированные. С момента открытия турбокодов проводились исследования по применению различных типов перемежите-

лей в их составе [2–7]. В различных сетях радиосвязи даже для одного и того же турбокода зачастую используют разные перемежители. Вопрос выбора конкретного типа перемежителя для использования в структуре турбокода исследован недостаточно.

В работе проведено исследование по выбору типа перемежителя на примере одного из самых популярных свёрточных турбокодов (13,15)<sub>8</sub> со скоростью кодирования 1/3. Данный турбокод включён в стандарты мобильной связи LTE (Long Term Evolution) [8] и UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [9]. Для формирования кода в данном турбокоде используются два рекурсивных систематических свёрточных кода с длиной кодового

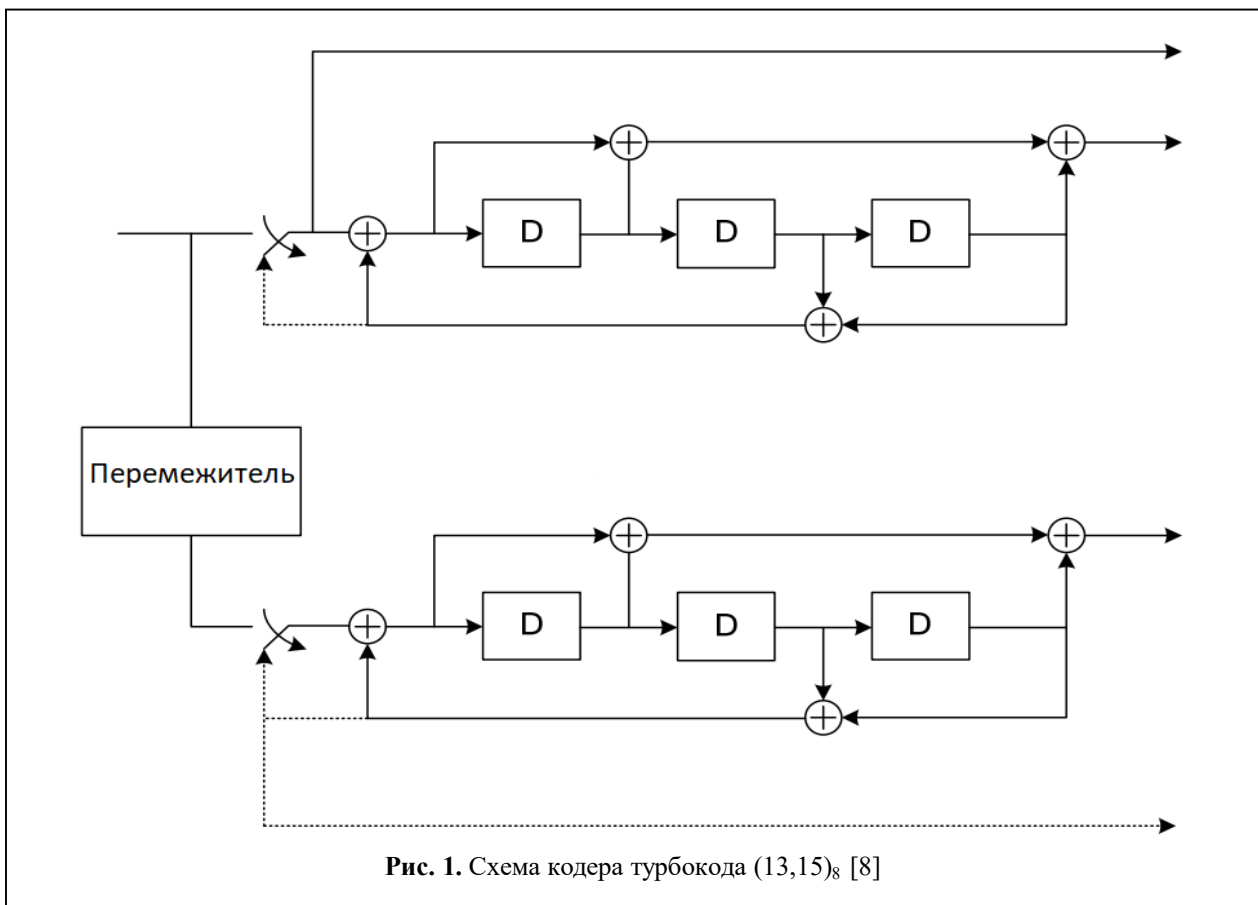


Рис. 1. Схема кодера турбокода (13,15)<sub>8</sub> [8]

ограничения  $K = 4$ . Структурная схема турбокода приведена на рис. 1.

### Рассмотренные алгоритмы перемежения бит и их параметры

1. Квадратичный полиномиальный перемежитель (Quadratic Permutation Polynomial — QPP) [10]. Этот блочный детерминированный перемежитель рекомендован к использованию в стандарте LTE [8]. Зависимость номера бита  $n_{ex}$  на выходе перемежителя от номера бита  $n_{en}$  на его входе определяется как

$$n_{ex} = (f_1 n_{en} + f_2 n_{en}^2) \bmod L, \quad (1)$$

где  $L$  — длина перемежителя, а коэффициенты  $f_1$  и  $f_2$  удовлетворяют условиям: 1) коэффициент  $f_1$  и размер блока перемежения  $L$  являются взаимно простыми числами; 2) все простые множители  $L$  также являются множителями  $f_2$ .

2. Перемежитель из стандарта UMTS [9]. При данном блочном детерминированном перемежении входные биты записываются в прямоугольную матрицу перемежения по

строкам. Количество строк  $R$  этой матрицы определяется в зависимости от длины перемежителя  $L$ : 1)  $R = 5$ , если  $L \in [40, 159]$ ; 2)  $R = 10$ , если  $L \in [160, 200]$  или  $L \in [481, 530]$ ; 3)  $R = 20$ , иначе. Количество столбцов  $C$  этой матрицы определяется следующим образом: 1)  $C = p - 1$ , если  $L \leq R(p-1)$ ; 2)  $C = p$ , если  $R(p-1) < L \leq Rp$ ; 3)  $C = p + 1$ , если  $Rp < L$ . Здесь первичный номер  $p$  находится в соответствии с правилами, указанными в [9]. После заполнения прямоугольной матрицы перемежитель из UMTS выполняет перестановку строк, а также перестановку элементов внутри строк по определённым алгоритмам, приведённым в [9]. В результате чего формируется новая прямоугольная матрица. Результатом работы перемежителя из UMTS является последовательность бит, считанная из данной матрицы в порядке сверху вниз последовательно по всем столбцам.

3. Блочный перемежитель (Block Interleaver — BI) [11–13]. Этот блочный детерминированный перемежитель является самым извест-

ным и одним из самых простых в реализации. Принцип работы ВІ состоит в том, что передаваемые биты записываются в таблицу размером  $R \times C$  по столбцам, а выходные биты считываются из неё по строкам. Зависимость номера бита  $n_{\text{ex}}$  на выходе перемежителя от номера бита  $n_{\text{en}}$  на его входе может быть выражена в явном виде по формуле:

$$n_{\text{ex}} = R n_{\text{en}} - (L - 1)[n_{\text{en}} / C], \quad (2)$$

где здесь и далее  $[x]$  — целая часть числа  $x$ .

4. Симметричный циклический перемежитель (Symmetric Cyclic Interleaver — SCI) [11]. Представляет собой блочный детерминированный перемежитель, функция перемежения которого имеет вид

$$n_{\text{ex}} = (a n_{\text{en}}) \bmod L, \quad (3)$$

где  $a$  — величина шага, определяющая расстояние между двумя соседними битами после перемежения. Величина шага определяется путём нахождения такого  $0 \leq m \leq L - 1$ , чтобы выполнялись условия: 1)  $(mL + 1)^{1/2} = a$  должно быть целым числом; 2) величины  $a$  и  $L$  должны быть взаимно простыми.

5. Спиральный свёрточный перемежитель (Convolutional Interleaver — CI) [14]. При данном типе перемежения входная последовательность делится на блоки размера  $R \times C$ , далее каждый блок записывается в матрицу, состоящую из  $C$  столбцов и необходимого для передачи всего пакета данных строк по спирали. Затем содержимое матрицы считывается по  $R$  строкам.

6. Случайный перемежитель (Random). Перестановки бит в случайном перемежителе генерируются с помощью датчика случайных чисел в диапазоне, ограниченном длиной перемежителя  $L$ . Важным свойством случайных перемежителей является то, что они устраняют регулярные зависимости в кодированной последовательности.

7. Псевдослучайный  $S$ -перемежитель (S-random). Это псевдослучайный перемежитель, при построении которого вводится критерий, определяющий минимально возможное расстояние  $S$  между соседними элементами

после перемежения. Алгоритм построения псевдослучайного  $S$ -перемежителя следующий: для текущего номера бита на выходе перемежителя ставится в соответствие случайно выбранное значение номера позиции бита на входе перемежителя, которое сравнивается со значениями входных бит, соответствующих  $S$  ранее выбранным номерам выходных бит. Если разница между текущим значением и хотя бы одним из  $S$  значений меньше или равно  $\pm S$ , то текущий выбор отклоняется и берётся другое случайное значение номера на входе перемежителя. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут выбраны все номера из диапазона  $[0, L - 1]$ . Эффективность турбокодера с ростом расстояния  $S$  увеличивается, однако сложность поиска такого перемежителя также увеличивается. Обычно перемежитель, обеспечивающий достаточно случайное и равномерное перемешивание, может быть построен с расстоянием  $S \approx (L / 2)^{1/2}$ , где  $L$  — размер перемежителя [11]. Распределение бит после перемежителя с большим значением  $S$  более однородно, что позволяет лучше разбивать короткие пакеты ошибок. Поскольку в свёрточных кодах короткие пакеты ошибок возникают значительно чаще длинных, общая эффективность турбокода увеличивается.

8. Псевдослучайный перемежитель с раздельным перемежением (Separate Pseudo-Random Interleaver — SPRI). Данное перемежение заключается в раздельном перемешивании 3-х групп бит: систематических и терминационных ( $x_k, d_k$ ), проверочных бит с выхода первого составного кода ( $z_k$ ) и проверочных бит с выхода второго составного кода ( $z'_k$ ). Далее, перемеженные проверочные биты записываются в общий буфер в чередующемся порядке и в конце перемеженные систематические и терминационные биты объединяются с чередующимися перемеженными в общем буфере.

Перемежение ( $x_k, d_k$ ) происходит путём строчной записи бит в таблицу размером  $R \times C$  и их последующего постолбцового считывания, где число столбцов определено как  $C = 32$ , а число строк —  $R = [(D_c + L) / C]$ ,  $D_c$  — номер

**Таблица 1.** Преобразование индексов проверочных бит при записи строки таблицы перемежения SPRI

$n_{en}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$n_{ex}$	0	16	8	24	4	20	12	28	2	18	10	26	6	22	14	30

$n_{en}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$n_{ex}$	1	17	9	25	5	21	13	29	3	19	11	27	7	23	15	31

столбца таблицы, в который записывается первый элемент перемежаемых бит. Значение  $D_c$  составляет 20. Стартовый номер строки для записи задан 0. Считывание начинается с 0-го столбца. При считывании столбца с номером  $d_c$  проверяется условие  $d_c < D_c$ . Если оно выполнено, то столбец считывается, начиная со строки с номером  $d_r = 1$ , в обратном случае — с  $d_r = 0$ . Таким образом гарантируется считывание всех записанных в таблицу бит.

Проверочные биты перемежаются с помощью таблицы размером  $R \times C$ , с  $C = 32$  и  $R = \lceil K / C \rceil$ , где  $K$  – длина закодированного сообщения без терминационных бит. Запись бит производится построчно, а считывание по столбцам. При построчной записи выполняется дополнительное перемежение с помощью перестановки элементов строки согласно таблице 1.

Побитовое считывание проверочных бит после перемежения происходит парами бит ( $z_k, z'_k$ ) из двух таблиц, что обеспечивает чередование проверочных бит двух составных кодеров. Начальные координаты процедуры постолбцового считывания ( $z_k$ ) определены как  $D_c = 0, D_r = 0$ , а ( $z'_k$ ) — соответственно как  $D_c = 15, D_r = 0$ . Для  $z'_k$  после считывания столбца с номером  $d_c = (C - 1)$  происходит возвращение к столбцу  $d_c = 0$ .

**Свойства перемежителей**

Свойства перемежителей могут быть описаны с помощью глубины перемежения  $J$ , под которой понимают минимальное расстояние на выходе перемежителя между двумя любыми элементами, которые были соседними на входе перемежителя, и нормированной дисперсии  $d$

[14]. Нормированная дисперсия характеризует случайность перестановки перемежителя и определяется по формуле

$$d = 2|D| / (L(L - 1)),$$

где  $|D|$  — мощность множества всех перестановок перемежителя.

Высокая дисперсия указывает на разнообразие переставленных расстояний между элементами, поэтому для обеспечения высокой дисперсии следует избегать регулярной структуры перестановки. Чем ближе к единице значение дисперсии, тем более случайной является структура перестановки.

В общем случае желательно, чтобы перемежитель имел высокую дисперсию и большую глубину перемежения [15]. Но данные функции взаимосвязаны, поэтому важно найти перемежитель со значениями дисперсии и глубины перемежения, которые обеспечивали бы достаточно случайное и при этом равномерное перемешивание бит.

Значения дисперсии  $d$  и глубины перемежения  $J$  для рассматриваемых перемежителей приведены в таблице 2. Случайный и детерминированный характер перестановок перемежителей продемонстрирован графически на рис. 2 и рис. 3, где приведены графики зависимостей номера бита  $n_{ex}$  на выходе перемежителей от номера бита  $n_{en}$  на входе на примере перемежителей с длиной  $L = 1056$  бит.

Из таблицы 2 видно, что детерминированные перемежители BI, SCI, QPP могут иметь большую глубину перемежения, однако их недостатком является низкое значение дисперсии, зависимость между глубиной перемежения и дисперсией обратная. Для детерминированных перемежителей зависимость позиций

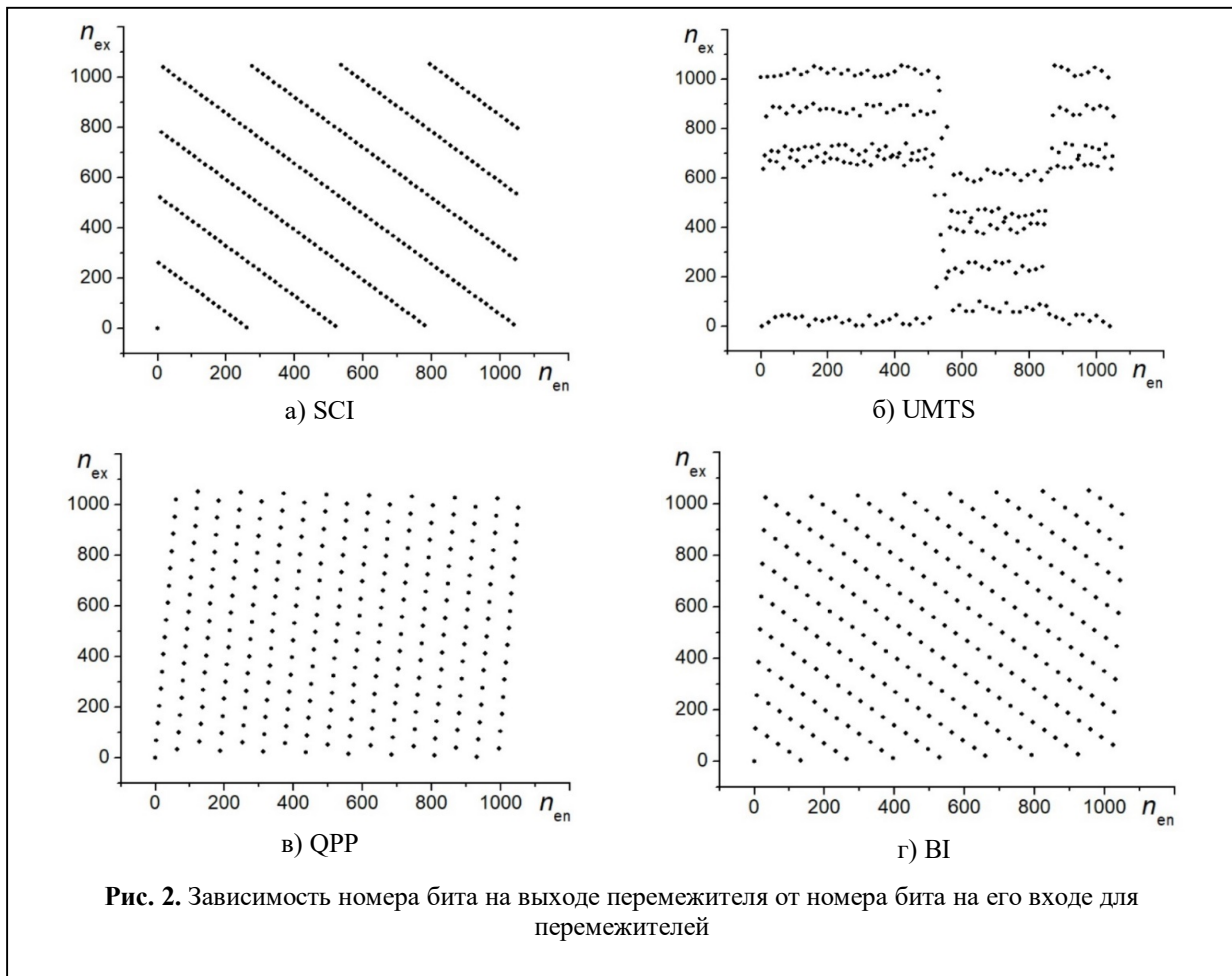
Таблица 2. Значения дисперсии  $d$  и глубины перемежения  $J$  для перемежителей

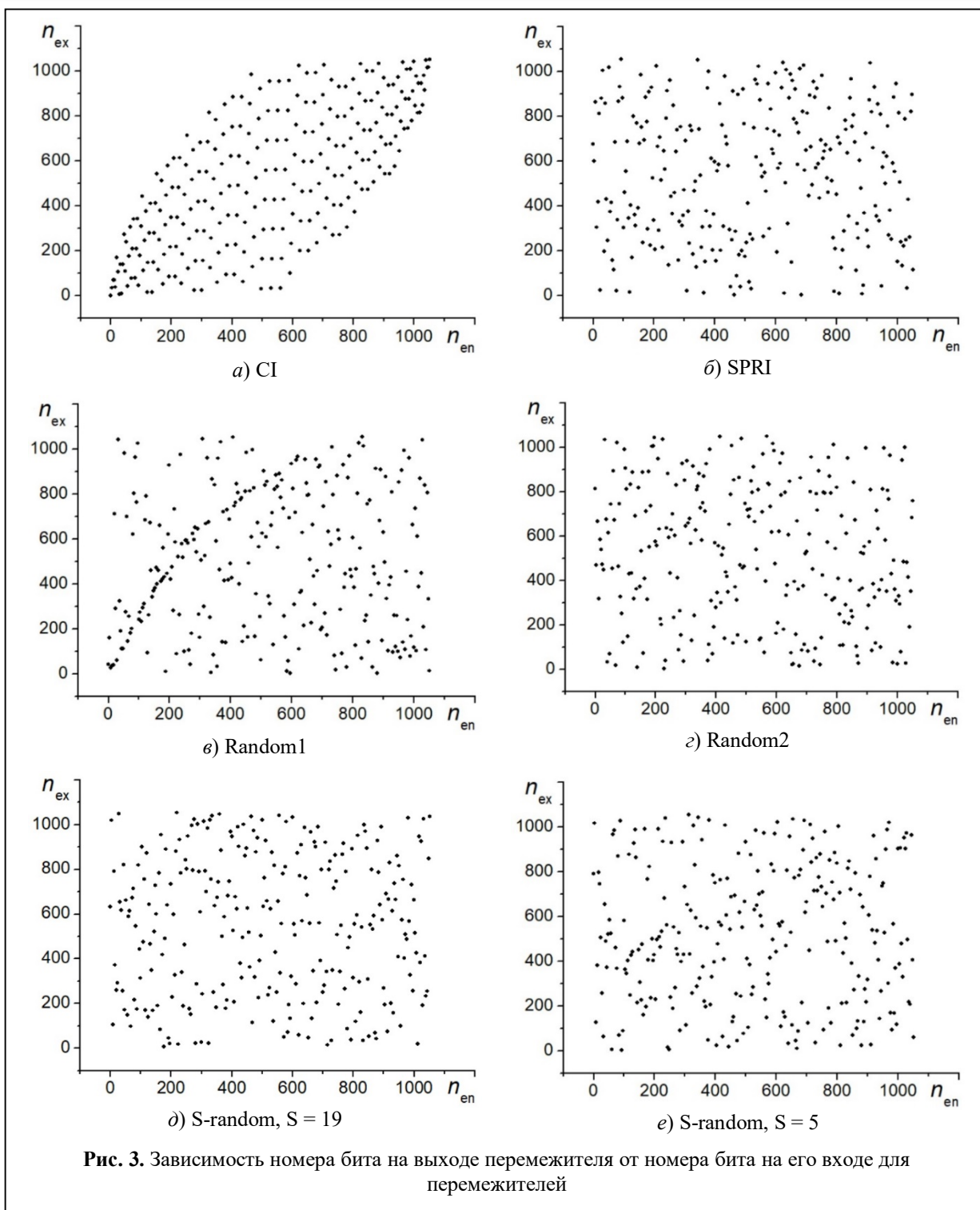
Перемежитель	Дисперсия $d$	Глубина перемежения $J$
CI	0,064	1
BI	0,004	33
SCI	0,004	65
QPP	0,019	35
Random2	0,812	2
UMTS	0,711	19
S-random, $S = 5$	0,812	6
SPRI	0,813	22
S-random, $S = 19$	0,812	20
Random1	0,809	1

элементов в перемеженном блоке от их позиций в исходном блоке имеет чётко выраженную периодическую структуру, что продемонстрировано на рис. 2, а), в), г). Детерминированные перемежители можно пред-

ставить в алгебраической форме и реализовать на основе достаточно простых алгоритмов, что является их достоинством.

Свёрточный перемежитель CI обеспечивает лучшую дисперсию, но имеет крайне низкое





значение глубины перемежения. При этом его перестановка, как видно на рис. 3, а), не имеет столь явной периодичности, как в случае детерминированных перемешителей BI, SCI, QPP.

В работе рассмотрено два случайных перемешителя Random1 и Random2. Они оба имеют достаточно высокую дисперсию. Однако «неконтролируемость» выбора случайных перестановок может привести как к хорошим, так и к не самым удовлетворительным результатам.

На рис. 3, в) и рис. 3, з) видна случайность перестановок и то, что некоторые номера бит после перемежения располагаются очень близко друг к другу. Это уменьшает эффективность применения данных перемежителей для разбиения некоторых последовательностей ошибок. К недостаткам случайных и псевдослучайных перемежителей можно отнести то, что перестановки невозможно выразить в алгебраической форме. Таблица перемежения генерируется предварительно и целиком хранится в памяти кодера/декодера.

Достаточно высокие значения  $d$  и  $J$  обеспечивает детерминированный перемежитель UMTS. Но он имеет вычислительно сложную систему построения, что вынуждает вычислять его таблицу перемежения заранее и хранить её в памяти так же, как и для случайных перемежителей. Но благодаря своей сложности, перемежение не имеет явной периодичности, что продемонстрировано на рис. 2, б).

Псевдослучайные перемежители SPRI и S-random показывают высокие значения дисперсии и глубины перемежения. На рис. 3, д) и рис. 3, е) приведены зависимости позиций элементов в перемеженном пакете от их позиций в исходном пакете для S-random перемежителя, когда  $S=19$  и  $S=5$ , демонстрирующие случайный характер перестановок. Перемежитель с меньшим расстоянием между соседними элементами  $S=5$  имеет менее равномерное распределение элементов и допускает достаточно близкое расположение элементов друг к другу. С увеличением расстояния на выходе перемежителя между соседними элементами на его входе  $S=19$  обеспечивается большая равномерность перемежения.

#### Анализ работы перемежителей

Анализ работы перемежителей проведён посредством моделирования в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и фазовой манипуляцией 2PSK. Зачастую в сетях радиосвязи необходимо передавать пакеты данных небольшого размера. Для такой ситуации, когда длина передаваемого пакета состав-

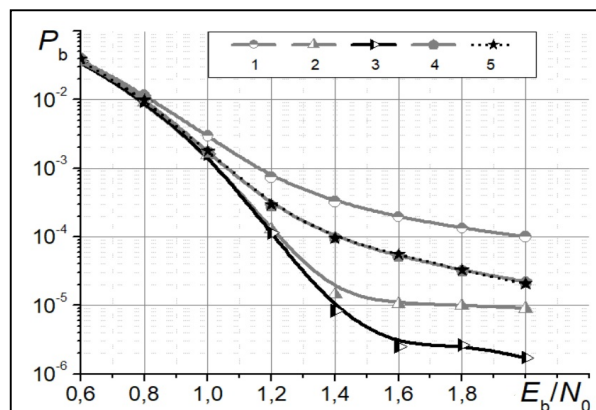


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум для свёрточного перемежителя 1 — CI; детерминированных перемежителей: 2 — QPP, 3 — UMTS, 4 — BI, 5 — SCI

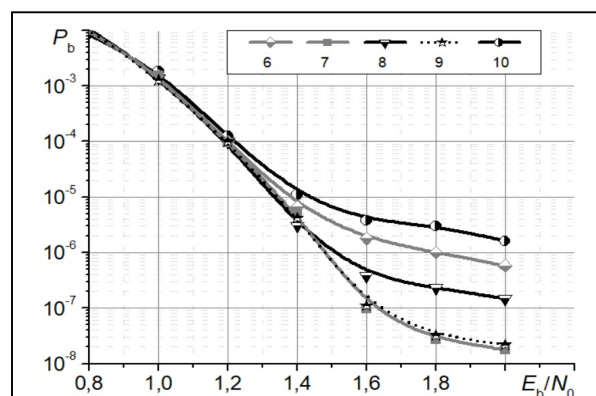


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум для псевдослучайных и случайных перемежителей: 6 — S-random ( $S=5$ ), 7 — S-random ( $S=19$ ), 8 — SPRI, 9 — Random1, 10 — Random2

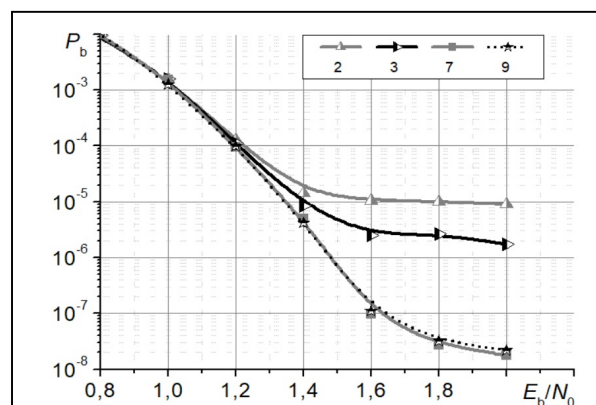


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум для перемежителей: 2 — QPP, 3 — UMTS, 7 — S-random ( $S=19$ ), 9 — Random1

ляет 1053 бит, и получены результаты моделирования. Результаты моделирования представлены на рис. 4–6, где приведена зависимость вероятности битовой ошибки  $P_b$  от отношения сигнал-шум  $E_b/N_0$  для рассматриваемых перемежителей. Необходимая точность оценок вероятности битовой ошибки достигалась передачей  $R$  пакетов,  $R \approx 9,5/P_b$ . Отношение сигнал/шум рассматривалось в виде относительных энергетических затрат на передачу одного бита сообщения  $E_b/N_0$ , где  $N_0$  — односторонняя спектральная плотность мощности АБГШ. Графики помехоустойчивости построены при 8-ми итерациях работы турбокода  $(13,15)_8$ , декодирование которого осуществлялось по алгоритму max-log-MAP [16, 17]. Результаты получены для следующих параметров перемежителей:  $a = 65$  для SCI;  $f_1 = 17, f_2 = 66$  для QPP;  $R = 32, C = 33$  для BI;  $R = 33, C = 32$  для CI.

Из графиков помехоустойчивости на рис. 4–6 видно, что алгоритм декодирования достигает определённого уровня несократимой вероятности ошибки, когда дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум практически не приводит к улучшению помехоустойчивости. На рисунках продемонстрировано, что выбор перемежителя влияет на уровень несократимой вероятности ошибки системы связи. В частности, турбокод с перемежителем Random1 достигнет  $P_b = 10^{-7}$  при  $E_b/N_0 = 1,6$  дБ, в то время как тот же самый турбокод с перемежителем CI в принципе не способен достичь значения  $P_b = 10^{-7}$ . Для обнаружения ошибок в пакете дополнительно часто используется CRC (Cyclic Redundancy Check). В результате чего пакеты с ошибками отбрасываются. Требуемое значение вероятности битовой ошибки для передачи данных зависит от требуемой вероятности пакетной ошибки. Использование не всех типов перемежителей способно обеспечить заданный уровень помехоустойчивости, что ещё раз подтверждает важность выбора внутреннего перемежителя для турбокода.

По графикам для детерминированных и свёрточного перемежителя, приведённым на рис. 4, видно, что свёрточный перемежитель CI

обеспечивает самую низкую помехоустойчивость системы связи. Это обусловлено свойствами его перестановки с низким значением глубины перемежения и невысоким значением дисперсии (см. таблицу 2). Недостаточная случайность в перестановках не позволяет перемежителям BI и SCI, имеющим высокие значения глубины перемежения, но крайне низкую дисперсию, обеспечить существенно больший уровень помехоустойчивости. Перемежитель QPP также имеет высокое значение глубины перемежения; его показатель дисперсии выше, что даёт ему возможность показать более высокую по сравнению с упомянутыми выше перемежителями помехоустойчивость. Лучшую помехоустойчивость среди рассмотренных детерминированных перемежителей обеспечивает перемежитель из стандарта UMTS, что обусловлено высокими значениями его дисперсии и глубины перемежения.

По графикам, приведённым на рис. 5, видно, что среди случайных и псевдослучайных перемежителей наименьшее значение  $P_b$  показывают два перемежителя — S-random при  $S = 19$  и Random1. Значения перестановки для случайного перемежителя Random1 выбраны произвольно. При этом перемежитель Random2, который также получен случайным образом, показал худший результат. Эффективность случайных перемежителей зависит от конкретно выбранной перестановки, которую невозможно заранее предугадать. Устранить данную неопределённость, как уже обсуждалось, позволяют S-random перемежители. Их перестановки гарантированно обеспечивают глубину перемежения  $J = S + 1$ . А высокое значение дисперсии обеспечивается за счёт случайности при выборе каждого следующего числа при построении таблицы перемежения. С увеличением параметра  $S$  эффективность работы перемежителя увеличивается, что подтверждается результатами моделирования, продемонстрированными на рис. 5.

На рис. 6 приведены графики помехоустойчивости для лучших по критерию минимизации вероятности битовой ошибки детермини-

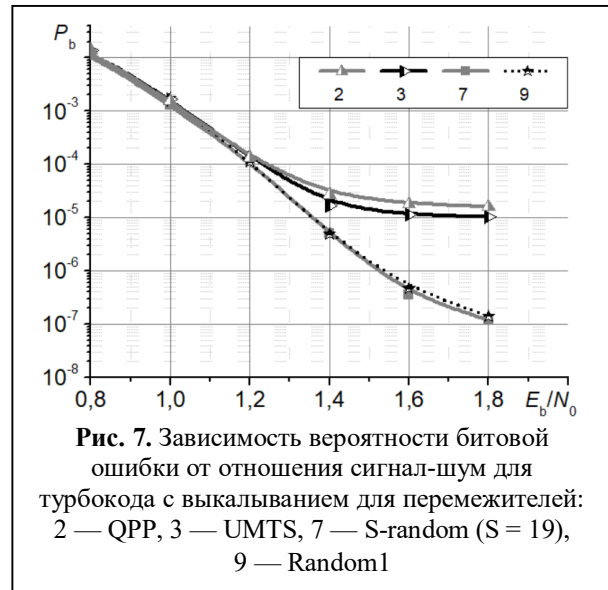


рованных и случайных перемежителей. По результатам моделирования лучшими случайными перемежителями оказались перемежители Random1 и S-random ( $S = 19$ ), а лучшими детерминированными — QPP и UMTS. Это во многом соотносится с выбором перемежителя на основе значений его дисперсии и глубины перемежения (таблица 2), хотя и не полностью. Лучшим по значениям дисперсии и глубины перемежения оказался перемежитель SPRI, который, хотя и вошёл в тройку лидеров по результатам моделирования среди случайных перемежителей, по помехоустойчивости оказался лишь третьим. Перемежитель Random1, ставший одним из лучших, имеет самое маленькое значение глубины перемежения  $J = 1$ . Высокий уровень помехоустойчивости можно объяснить тем, что вероятно расстояние между разнесёнными битами  $J = 1$  встречается редко для данного перемежителя, и поэтому не оказывает существенного влияния на его эффективность.

В случае выкалывания, увеличивающего скорость турбокода с  $1/3$  до  $2/3$ , характер полученных зависимостей сохраняется, что продемонстрировано на рис. 7.

Полученные результаты являются универсальными для рассматриваемой модели канала с АБГШ и могут быть применены как для последовательных (одночастотных) систем цифровой связи, так и для параллельных (многочастотных), использующих ортогональное частотное мультиплексирование гармонических составляющих (поднесущих), так называемые OFDM-системы связи (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Таким образом, в качестве внутреннего перемежителя для свёрточного турбокода  $(13,15)_8$  рекомендуется к использованию перемежитель S-random, как обеспечивающий лучшую помехоустойчивость системы по критерию минимальной вероятности битовой ошибки. Также на основе проведённого исследования можно сделать вывод, что такие свойства перемежителя, как дисперсия и глубина перемежения, позволяют грубо про-



гнозировать его эффективность при работе турбокода.

#### Литература

1. Heegard C., Wicker S.B. Turbo Coding. New York: Kluwer Academic Publishers, 1999. 206 p.
2. Barbulescu A., Pietrobon S.S. Interleaver design for turbo codes // Electronic Letters. 1994. Vol. 30. Pp. 2108. DOI: 10.1049/EL:19941434.
3. Croizer S., Lodge J., Guinand P., Hunt A. Performance of turbo-codes with relative prime and golden interleaving strategies // International Mobile Satellite Conference. Ottawa. 1999. Pp. 268–275.
4. Hokfelt J., Maseng T., Edfors O. Assessing interleaver suitability for turbo codes // Nordic Radio Symposium. Saltsjobaden, Sweden. 1998.
5. Takeshita O.Y., Costello Jr.D.J. New classes of algebraic interleavers for turbo-codes // IEEE International Symposium on Information Theory. MIT, Cambridge, MA USA. 1998. P. 419.
6. Barbulescu A.S., Pietrobon S.S. Interleaver design for three dimensional turbo codes // IEEE International Symposium on Information Theory. 1995. P. 37.
7. Ho M.S.C., Pietrobon S.S., Giles T. Interleavers for punctured turbo codes // APCC/ICCS. Singapore. 1998. Vol. 2. Pp. 520–524.
8. 3GPP TS 36.212: «LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding», 73 p., 2011.
9. 3GPP TS 25.212: «Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Multiplexing and channel coding (FDD)», 171 p., 2017.
10. Sun J., Takeshita O.Y. Interleavers for turbo codes using permutation polynomial over integer rings // IEEE Transactions on Information Theory. 2005. Vol. 51, No 1. Pp. 101–119. DOI: 10.1109/TIT.2004.839478.

11. Dolinar S., Divsalar D. Weight distribution for turbo codes using random and nonrandom permutations // JPL TDA Progress Report. 1995. Pp. 56–65.

12. Wicker S. B. Error Control Systems for Digital Communication and Storage. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, 1995. 512 p.

13. Rappaport T. S. Wireless Communications Principles and Practice. New York: Prentice Hall PTR, 1996. 641 p.

14. Баринов А.Ю. Перемежение в канальном кодировании: свойства, структура, специфика применения // Журнал радиоэлектроники [электронный

журнал]. 2019. №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/13/text.pdf> (дата обращения 18.01.2024).

15. Johnson S.J. Iterative error correction. Turbo, low-density parity-check and repeat accumulate codes. New York: Cambridge University Press, 2010. 335 p.

16. Koch W., Baier A. Optimum and sub-optimum detection of coded data disturbed by time-varying intersymbol interference // IEEE Globecom. 1990. Pp. 1679–1684.

17. Erfanian J., Pasupathy S., Gulak G. Reduced complexity symbol detectors with parallel structures for ISI channels // IEEE Transactions on Communications. 1994. Vol. 42. Pp. 1661–1671.

Поступила 21 ноября 2023 г.

English

## TYPE SELECTION OF INTERNAL INTERLEAVER FOR CONVOLUTIONAL TURBOCODE (13,15)<sub>8</sub>

Anatoliy Vladimirovich Kolobkov — PhD, Deputy Head of the Center for Innovative Development, JSC «RPC «Polyot».

E-mail: [antvk@mail.ru](mailto:antvk@mail.ru)

Daria Vyacheslavovna Khideva — Research Associate, JSC «RPC «Polyot».

Address: 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Komsomolskaya Square, 1.

*Abstract:* The paper examines the convolutional turbocode (13,15)<sub>8</sub> widely used in radio communication networks. This turbocode is used with various interleaving patterns in different networks, which raises the question of the interleaver type selection. The article investigates the impact of the interleaver's various types on the noise immunity of the communication system with convolutional turbocode in order to define the interleaving pattern that ensures the lowest value of bit error probability. Convolutional, deterministic, random and pseudorandom interleavers are reviewed. Interleavers' performance quality analysis was done using simulation method. The obtained results are compared with the interleaving properties: variance and depth. The conducted research suggests that the variance and depth of the interleaving can generally predict its operation efficiency within the turbocode. UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) standard interleaver turned out to be the best among the reviewed deterministic type interleavers as per mathematical simulation results. It is highlighted that random interleavers can improve the noise immunity of a communication system compared to deterministic interleavers. However, the uncontrollability of random permutations cannot guarantee that the selected permutation will always ensure the lowest value of error probability. Posing restrictions on the random sequence by way of the minimum possible distance  $S$  between adjacent elements after interleaving enables to ensure high noise immunity when choosing permutations. Such a permutation ensures a large interleaving depth equal to  $S + 1$ . Moreover, a high variance value is ensured due to the randomness in choosing each next number when building the interleaving table. Thus,  $S$ -random interleaver is recommended for use as an internal interleaver for the convolutional turbocode (13,15)<sub>8</sub>, to ensure the best noise immunity of the system by the criterion of the minimum bit error probability.

*Keywords:* deterministic interleaver, pseudorandom interleaver, convolutional turbocode, noise immunity, interleaving variance, interleaving depth.

### References

1. Heegard C., Wicker S.B. Turbo Coding. New York: Kluwer Academic Publishers, 1999. 206 p.
2. Barbulescu A., Pietrobon S.S. Interleaver design for turbo codes. Electronic Letters. 1994. Vol. 30. Pp. 2108. DOI: 10.1049/EL:19941434.
3. Croizer S., Lodge J., Guinand P., Hunt A. Performance of turbo-codes with relative prime and golden interleaving strategies. International Mobile Satellite Conference. Ottawa. 1999. Pp. 268–275.
4. Hokfelt J., Maseng T., Edfors O. Assessing interleaver suitability for turbo codes. Nordic Radio Symposium. Saltsjobaden, Sweden. 1998.

5. *Takeshita O.Y., Costello Jr.D.J.* New classes of algebraic interleavers for turbo-codes. IEEE International Symposium on Information Theory. MIT, Cambridge, MA USA. 1998. P. 419.
6. *Barbulescu A.S., Pietrobon S.S.* Interleaver design for three dimensional turbo codes. IEEE International Symposium on Information Theory. 1995. P. 37.
7. *Ho M.S.C., Pietrobon S.S., Giles T.* Interleavers for punctured turbo codes. APCC/ICCS. Singapore. 1998. Vol. 2. Pp. 520–524.
8. 3GPP TS 36.212: «LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding», 2011. 73 p.
9. 3GPP TS 25.212: «Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Multiplexing and channel coding (FDD)», 2017. 171 p.
10. *Sun J., Takeshita O.Y.* Interleavers for turbo codes using permutation polynomial over integer rings. IEEE Transactions on Information Theory. 2005. Vol. 51, No 1. Pp. 101–119. DOI: 10.1109/TIT.2004.839478.
11. *Dolinar S., Divsalar D.* Weight distribution for turbo codes using random and nonrandom permutations. JPL TDA Progress Report. 1995. Pp. 56–65.
12. *Wicker S. B.* Error Control Systems for Digital Communication and Storage. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, 1995. 512 p.
13. *Rappaport T. S.* Wireless Communications Principles and Practice. New York: Prentice Hall PTR, 1996. 641 p.
14. *Barinov A.Yu.* Interleaving in channel coding: properties, structure, specifics of application. Journal of Radioelectronics. 2019. No. 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/13/text.pdf> (access date 18.01.2024).
15. *Johnson S.J.* Iterative error correction. Turbo, low-density parity-check and repeat accumulate codes. New York: Cambridge University Press, 2010. 335 p.
16. *Koch W., Baier A.* Optimum and sub-optimum detection of coded data disturbed by time-varying inter-symbol interference. IEEE Globecom. 1990. Pp. 1679–1684.
17. *Erfanian J., Pasupathy S., Gulak G.* Reduced complexity symbol detectors with parallel structures for ISI channels. IEEE Transactions on Communications. 1994. Vol. 42. Pp. 1661–1671.