

ИНФОРМАТИКА

УДК 519.711.3

МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ K -КАНАЛОВ С ПАМЯТЬЮ

А. А. Львов¹, М. С. Светлов², Ю. А. Ульянина³

¹ Доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., alvova@mail.ru

² Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, svetlovms@yandex.ru

³ Аспирантка кафедры информационных систем и технологий, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., uyanina.ya@mail.ru

Исследование недвоичных (K -ичных, $K \geq 3$) информационных каналов (ИК) с памятью как сложных стохастических структур — математически достаточно сложная задача. Существенный интерес представляет синтез упрощенных математических моделей таких каналов, позволяющих относительно просто выявить важнейшие закономерности протекающих в них реальных процессов. Моделирование K -ичных ИК (K -каналов) с памятью — актуальная задача, решение которой имеет как теоретическое, так и явно выраженное практическое значение. В работе рассмотрены модели дискретных K -каналов с памятью, построены их графы переходных вероятностей для различных режимов работы, оценены вероятности исходов приема символов используемого канального алфавита.

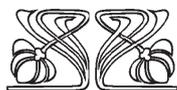
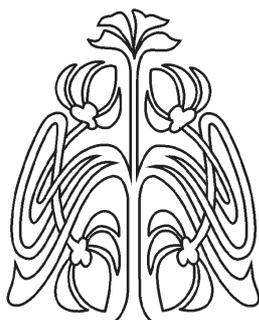
Ключевые слова: K -канал, математическая модель, переходная вероятность, безусловная вероятность.

ВВЕДЕНИЕ

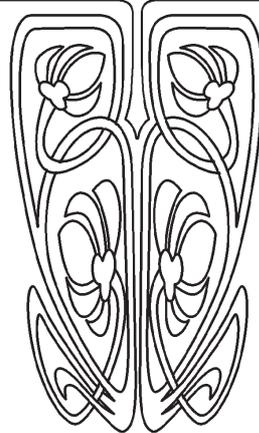
Синтез и исследование многофункциональных цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) требуют математического моделирования наиболее ответственной части этих систем — информационного канала (ИК). Анализ ИК современных систем показал, что наибольший интерес при их описании представляют модели цифровых каналов с памятью. Простейшие модели таких каналов подробно рассмотрены в работах [1–3]. Особый интерес представляют модели цифровых ИК со стираниями [4–6]. Рассматриваемые в большинстве работ модели не позволяют в полной мере адекватно оценить влияние искажений в ИК на процессы передачи-приема символов канального алфавита. Целью настоящей работы является обсуждение принципов синтеза наиболее важных с теоретической и практической точек зрения вариантов математических моделей K -каналов на базе модели Маркова.

1. МОДЕЛЬ НЕСИММЕТРИЧНОГО K -КАНАЛА ОБЩЕГО ТИПА

Наиболее общий вариант модели ИК — модель несимметричного K -канала, в котором помехи или, в общем случае, любые искажения передаваемого сигнала приводят к ошибкам произвольного типа — трансформации и (или) стирания. В таком канале возможно возникновение взаимных ошибок трансформации символов i, j канального



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





алфавита ($i, j = 0, 1, 2, \dots, K - 1; i \neq j$) с вероятностями p_{ij} и ошибок стирания с вероятностями p_{ix_i} , приводящих к переходу канальных символов i в символы стирания x_i , отсутствующие во входном канальном алфавите. При синтезе моделей использована ранее предложенная авторами кодовая метрика [7], в соответствии с аксиомами которой переход ненулевых (токовых) символов канального алфавита друг в друга или в «чужие» символы стирания обусловлен двукратными ошибками в отличие от трансформаций и стираний с участием нулевых символов, соответствующих однократным ошибкам. Поэтому считается, что в последовательном синхронном канальном интерфейсе в каждом такте синхронизации в канале может возникнуть лишь однократная ошибка, искажающая один символьный разряд передаваемого кодового слова. Другими словами, не возможны однократные трансформации токовых символов друг в друга и стирания алфавитных символов в «чужие» символы стирания.

Матрица $P_{0,nc}$ переходных вероятностей такой модели имеет вид

$$P_{0,nc} = \begin{bmatrix} q_0^0 & q_j^0 & p_{0j}^0 & p_{j0}^0 & p_{0x_j}^0 & p_{x_j0}^0 \\ q_0^i & q_j^i & p_{0j}^i & p_{j0}^i & p_{0x_j}^i & p_{jx_j}^i \\ q_0^{0i} & q_j^{0i} & p_{0j}^{0i} & p_{j0}^{0i} & p_{0x_j}^{0i} & p_{jx_j}^{0i} \\ q_0^{i0} & q_j^{i0} & p_{0j}^{i0} & p_{j0}^{i0} & p_{0x_j}^{i0} & p_{x_j0}^{i0} \\ q_0^{0x_i} & q_j^{0x_i} & p_{0j}^{0x_i} & p_{j0}^{0x_i} & p_{0x_j}^{0x_i} & p_{jx_j}^{0x_i} \\ q_0^{ix_i} & q_j^{ix_i} & p_{0j}^{ix_i} & p_{j0}^{ix_i} & p_{0x_j}^{ix_i} & p_{jx_j}^{ix_i} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В матрице (1) обозначено: $q_0^0, q_j^0 (q_0^i, q_j^i)$ — условные вероятности правильного приема $(l + 1)$ -го нулевого и токового символов соответственно при правильном приеме l -го нулевого (токового) символа; $q_0^{0i}, q_j^{0i}, (q_0^{i0}, q_j^{i0})$ — условные вероятности правильного приема $(l + 1)$ -го нулевого и токового символов соответственно при трансформации l -го нулевого (токового) символа; $p_{0j}^0, p_{j0}^0 (p_{0j}^i, p_{j0}^i)$ — условные вероятности трансформации $(l + 1)$ -го нулевого и токового символов соответственно при правильном приеме l -го нулевого (токового) символа; $p_{0j}^{0i}, p_{j0}^{0i} (p_{0j}^{i0}, p_{j0}^{i0})$ — условные вероятности трансформации $(l + 1)$ -го нулевого и токового символов соответственно если l -й нулевой (токовый) символ трансформирован; $q_0^{0x_i}, q_j^{0x_i} (q_0^{ix_i}, q_j^{ix_i})$ — условные вероятности правильного приема $(l + 1)$ -го нулевого и токового символов соответственно при стирании l -го нулевого (токового) символа; $p_{0j}^{0x_i}, p_{j0}^{0x_i} (p_{0j}^{ix_i}, p_{j0}^{ix_i})$ — условные вероятности трансформации $(l + 1)$ -го нулевого и токового символов соответственно при стирании l -го нулевого (токового) символа; $p_{0x_j}^0, p_{x_j0}^0 (p_{0x_j}^i, p_{jx_j}^i)$ — условные вероятности стирания $(l + 1)$ -го символа при правильном приеме l -го нулевого (токового) символа; $p_{0x_j}^{0i}, p_{jx_j}^{0i} (p_{0x_j}^{i0}, p_{x_j0}^{i0})$ — условные вероятности стирания $(l + 1)$ -го символа при трансформации l -го нулевого (токового) символа; $p_{0x_j}^{0x_i}, p_{jx_j}^{0x_i} (p_{0x_j}^{ix_i}, p_{jx_j}^{ix_i})$ — условные вероятности стирания $(l + 1)$ -го символа при стирании l -го нулевого (токового) символа.

Следует заметить, что значения последующих символов, в общем случае, не зависят от значений предыдущих символов на входе канала, поэтому для l -х и $(l + 1)$ -х символов выполнение условия $i \neq j$ не обязательно.

Граф переходных вероятностей, соответствующий матрице (1), приведен на рис. 1.

Уравнение математической модели:

$$\begin{aligned} & P(l_0) \left[q_0 \left(q_0^0 + q_j^0 + \sum_{j=1}^{K-1} (p_{j0}^0 + p_{0x_j}^0) + p_{j0}^0 + p_{x_j0}^0 \right) + \right. \\ & + \sum_{i=1}^{K-1} \left(p_{0i} \left(q_0^{0i} + q_j^{0i} + \sum_{j=1}^{K-1} (p_{j0}^{0i} + p_{0x_j}^{0i}) + p_{j0}^{0i} + p_{jx_j}^{0i} \right) + \right. \\ & \left. \left. + p_{0x_i} \left(q_0^{0x_i} + q_j^{0x_i} + \sum_{j=1}^{K-1} (p_{j0}^{0x_i} + p_{0x_j}^{0x_i}) + p_{j0}^{0x_i} + p_{jx_j}^{0x_i} \right) \right) \right] + \\ & + P(l_i) \left[q_i \left(q_0^i + q_j^i + \sum_{j=1}^{K-1} (p_{j0}^i + p_{0x_j}^i) + p_{j0}^i + p_{jx_j}^i \right) + \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^{K-1} \left(p_{i0} \left(q_0^{i0} + q_j^{i0} + \sum_{j=1}^{K-1} (p_{j0}^{i0} + p_{0x_j}^{i0}) + p_{j0}^{i0} + p_{jx_j}^{i0} \right) + \right. \right. \end{aligned}$$



$$+ p_{ix_i} \left(q_0^{ix_i} + q_j^{ix_i} + \sum_{j=1}^{K-1} (p_{j0}^{ix_i} + p_{0x_j}^{ix_i}) + p_{j0}^{ix_i} + p_{jx_j}^{ix_i} \right) \Big] = 1. \quad (2)$$

В уравнении (2) $P(l_0)$ и $P(l_i)$ — вероятности поступления на вход канала l -го нулевого и токовых символов канального алфавита соответственно.

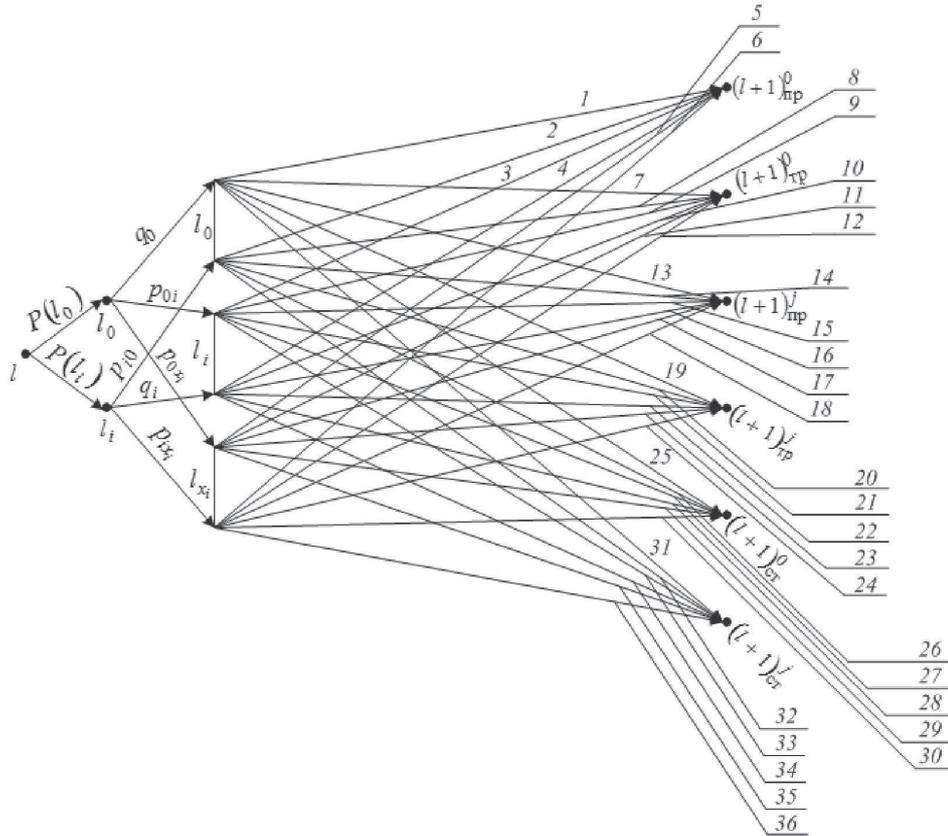


Рис. 1. Граф переходных вероятностей модели несимметричного K -канала общего вида: 1 — q_0^0 ; 2 — q_0^{i0} ; 3 — q_0^{0i} ; 4 — q_0^i ; 5 — $q_0^{0x_i}$; 6 — $q_0^{ix_i}$; 7 — q_0^j ; 8 — q_0^{i0} ; 9 — q_0^{0j} ; 10 — q_0^{ij} ; 11 — $q_0^{0x_i}$; 12 — $q_0^{ix_i}$; 13 — q_j^0 ; 14 — q_j^{i0} ; 15 — q_j^{0i} ; 16 — q_j^i ; 17 — $q_j^{0x_i}$; 18 — $q_j^{ix_i}$; 19 — q_{j0}^0 ; 20 — q_{j0}^{i0} ; 21 — q_{j0}^{0i} ; 22 — q_{j0}^i ; 23 — $q_{j0}^{0x_i}$; 24 — $q_{j0}^{ix_i}$; 25 — $q_{0x_j}^0$; 26 — $q_{0x_j}^{i0}$; 27 — $q_{0x_j}^{0i}$; 28 — $q_{0x_j}^i$; 29 — $q_{0x_j}^{0x_i}$; 30 — $q_{0x_j}^{ix_i}$; 31 — $q_{jx_j}^0$; 32 — $q_{jx_j}^{i0}$; 33 — $q_{jx_j}^{0i}$; 34 — $q_{jx_j}^i$; 35 — $q_{jx_j}^{0x_i}$; 36 — $q_{jx_j}^{ix_i}$

Граф на рис.1 и уравнение (2) в совокупности представляют собой математическую модель марковского несимметричного K -канала с ошибками трансформации и стирания.

Условные вероятности $q_0(l+1/l)$, $q_j(l+1/l)$ правильного приема, $p_{0j}(l+1/l)$, $p_{j0}(l+1/l)$ трансформации и $p_{0x_j}(l+1/l)$, $p_{jx_j}(l+1/l)$ стирания $(l+1)$ -х нулевого и единичного символов соответственно запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} q_0(l+1/l) &= q_0 q_0^0 + \sum_{i=1}^{K-1} (p_{0i} q_0^{0i} + p_{0x_i} q_0^{0x_i}) + p_{i0} q_0^{0i} + q_i q_0^i + p_{ix_i} q_0^{ix_i}, \\ q_j(l+1/l) &= q_0 q_j^0 + \sum_{i=1}^{K-1} (p_{0i} q_j^{0i} + p_{0x_i} q_j^{0x_i}) + p_{i0} q_j^{0i} + q_i q_j^i + p_{ix_i} q_j^{ix_i}, \\ p_{0j}(l+1/l) &= q_0 p_{0j}^0 + \sum_{i=1}^{K-1} (p_{0i} p_{0j}^{0i} + p_{0x_i} p_{0j}^{0x_i}) + p_{i0} p_{0j}^{0i} + q_i p_{0j}^i + p_{ix_i} p_{0j}^{ix_i}, \\ p_{j0}(l+1/l) &= q_0 p_{j0}^0 + \sum_{i=1}^{K-1} (p_{0i} p_{j0}^{0i} + p_{0x_i} p_{j0}^{0x_i}) + p_{i0} p_{j0}^{0i} + q_i p_{j0}^i + p_{ix_i} p_{j0}^{ix_i}, \\ p_{0x_j}(l+1/l) &= q_0 p_{0x_j}^0 + \sum_{i=1}^{K-1} (p_{0i} p_{0x_j}^{0i} + p_{0x_i} p_{0x_j}^{0x_i}) + p_{i0} p_{0x_j}^{0i} + q_i p_{0x_j}^i + p_{ix_i} p_{0x_j}^{ix_i}, \\ p_{jx_j}(l+1/l) &= q_0 p_{jx_j}^0 + \sum_{i=1}^{K-1} (p_{0i} p_{jx_j}^{0i} + p_{0x_i} p_{jx_j}^{0x_i}) + p_{i0} p_{jx_j}^{0i} + q_i p_{jx_j}^i + p_{ix_i} p_{jx_j}^{ix_i}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



Система (3) позволяет определить значения безусловных вероятностей q_0, q_j правильного приема, p_{0j}, p_{j0} трансформации и p_{0x_j}, p_{jx_j} стирания для нулевого и токовых символов соответственно.

2. МОДЕЛЬ СИММЕТРИЧНОГО К-КАНАЛА ОБЩЕГО ТИПА

Представленная выше модель не проста для практической реализации, поэтому предпочтительнее использовать модели симметричных ИК, соответствующие ЦСПИ с искусственным симметрированием за счет особого построения первой решающей схемы приемных устройств систем. В этом случае будут выполняться соотношения:

$$\left. \begin{aligned} q_i &= q, & p_{0x_i} &= p_{ix_i} = p_x, & p_{0j}^0 &= p_{j0}^0 = p_{\text{тр}}^0, & p_{0i} &= p_{i0} = p_0, \\ q_0^i &= q_0^{\text{т}}, & q_0^{0i} &= q_0^{i0} = q_0^{\text{тп}}, & p_{0j}^i &= p_{j0}^i = p_{\text{тр}}^{\text{т}}, & p_{0j}^{0i} &= p_{j0}^{0i} = p_{0j}^{i0}, \\ q_j^0 &= q_{\text{т}}^0, & q_j^{0i} &= q_j^{i0} = q_{\text{т}}^{\text{тп}}, & p_{0j}^{ix_i} &= p_{j0}^{ix_i} = p_{\text{тр}}^x, & p_{0x_j}^{0i} &= p_{jx_j}^{0i} = p_{0x_j}^{i0}, \\ q_j^i &= q_{\text{т}}^{\text{т}}, & q_0^{0x_i} &= q_0^{ix_i} = q_0^x, & p_{0x_j}^0 &= p_{xj0}^0 = p_x^0, & p_{0x_j}^{0x_i} &= p_{jx_j}^{0x_i} = p_{0x_j}^{ix_i}, \\ & & q_j^{0x_i} &= q_j^{ix_i} = q_{\text{т}}^x, & p_{0x_j}^i &= p_{jx_j}^i = p_{\text{т}}^x, & & \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где q_0, q, p_0, p_x — вероятности правильного приема нулевого, токового, трансформации, стирания $(l + 1)$ -го символа при правильном приеме нулевого, правильном приеме токового, трансформации, стирании l -го символа; $q_0^0, q_0^{\text{т}}, q_0^{\text{тп}}, q_0^x$ ($q_{\text{т}}^0, q_{\text{т}}^{\text{т}}, q_{\text{т}}^{\text{тп}}, q_{\text{т}}^x, p_{\text{тр}}^0, p_{\text{тр}}^{\text{т}}, p_{\text{тр}}^{\text{тп}}, p_{\text{тр}}^x, p_x^0, p_x^{\text{т}}, p_x^{\text{тп}}, p_x^x$) — условные вероятности правильного приема нулевого (правильного приема токового, трансформации, стирания) $(l + 1)$ -го символа соответственно при правильном приеме нулевого, правильном приеме токового, трансформации, стирании l -го символа.

Тогда матрица $P_{\text{о.нс}}$ переходных вероятностей (1) преобразуется к виду матрицы $P_{\text{о.с}}$:

$$P_{\text{о.с}} = \begin{bmatrix} q_0^0 & q^0 & p_{\text{тр}}^0 & p_x^0 \\ q_0^{\text{т}} & q_{\text{т}}^{\text{т}} & p_{\text{тр}}^{\text{т}} & p_x^{\text{т}} \\ q_0^{\text{тп}} & q_{\text{т}}^{\text{тп}} & p_{\text{тр}}^{\text{тп}} & p_x^{\text{тп}} \\ q_0^x & q_{\text{т}}^x & p_{\text{тр}}^x & p_x^x \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Граф переходных вероятностей для модели (5) симметричного ИК с ошибками трансформации и стирания представлен на рис. 2.

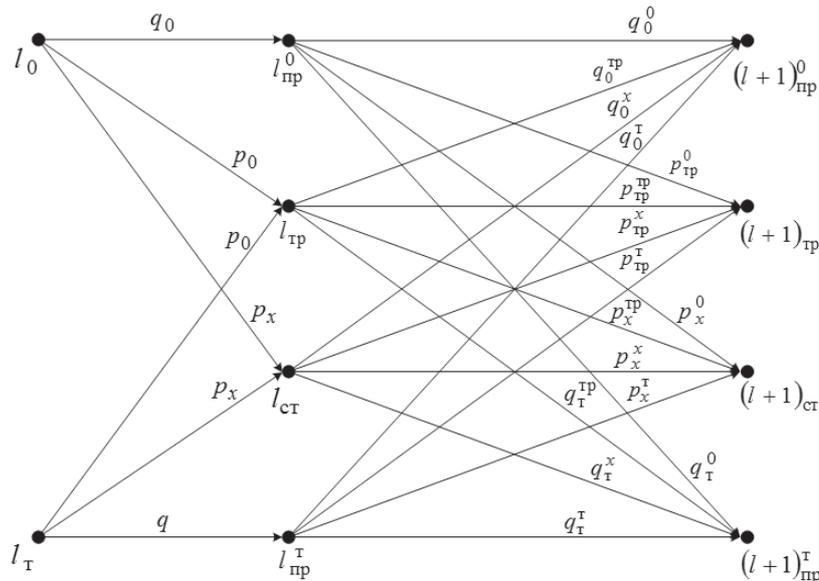


Рис. 2. Граф переходных вероятностей модели симметричного К-канала общего вида

По аналогии с (2) уравнение математической модели запишется в виде

$$q_0 \left(q_0^0 + q_0^{\text{т}} + K (p_{\text{тр}}^0 + p_x^0) \right) + q \left(q_0^{\text{т}} + q_0^{\text{ст}} + K (p_{\text{тр}}^{\text{т}} + p_x^{\text{т}}) \right) +$$



$$+p_0 \left(q_0^{\text{TP}} + q_{\tau}^{\text{TP}} + K \left(p_{\text{TP}}^{\text{TP}} + p_x^{\text{TP}} \right) \right) + p_x \left(q_0^x + q_{\tau}^x + K \left(p_{\text{TP}}^x + p_x^x \right) \right) = 1. \quad (6)$$

Граф на рис. 2 и обобщенное соотношение (6) в совокупности представляют собой математическую модель марковского симметричного ИК с ошибками трансформации и стирания.

По аналогии с предыдущим вариантом модели условные вероятности $q_0(l+1/l)$, $q(l+1/l)$, $p_0(l+1/l)$, $p_x(l+1/l)$ правильного приема нулевого, токового, трансформации, стирания соответственно для $(l+1)$ -го символа запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} q_0(l+1/l) &= q_0 q_0^0 + q q_0^{\tau} + K \left(p_0 q_0^{\text{TP}} + p_x q_0^x \right), \\ q_{\tau}(l+1/l) &= q_0 q_{\tau}^0 + q q_{\tau}^{\tau} + K \left(p_0 q_{\tau}^{\text{TP}} + p_x q_{\tau}^x \right), \\ p_0(l+1/l) &= q_0 p_0^0 + q p_0^{\tau} + K \left(p_0 p_0^{\text{TP}} + p_x p_0^x \right), \\ p_x(l+1/l) &= q_0 p_x^0 + q p_x^{\tau} + K \left(p_0 p_x^{\text{TP}} + p_x p_x^x \right). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7), можно получить формулы для определения безусловных вероятностей q_0 , q , p_0 , p_x .

Следует заметить, что в уравнении (6) не учитываются априорные вероятности $P(l_0)$ и $P(l_{\tau})$ появления на входе канала l -х нулевых и токовых символов соответственно, так как для симметричных K -каналов эти вероятности практически всегда считаются одинаковыми, если рабочее кодовое множество является полным: $P(l_0) = P(l_{\tau}) = P(l) = 1/K$.

3. МОДЕЛЬ СИММЕТРИЧНОГО K -КАНАЛА С ОШИБКАМИ ТРАНСФОРМАЦИИ

Особый интерес представляют частные случаи модели симметричного K -канала с ошибками произвольного типа. Матрица P_{τ} переходных вероятностей модели симметричного K -канала с ошибками трансформации (без стираний) запишется в виде

$$P_{\tau} = \begin{bmatrix} q_0^0 & q_{\tau}^0 & p_{\text{TP}}^0 \\ q_0^{\tau} & q_{\tau}^{\tau} & p_{\text{TP}}^{\tau} \\ q_0^{\text{TP}} & q_{\tau}^{\text{TP}} & p_{\text{TP}}^{\text{TP}} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Граф переходных вероятностей модели (8) представлен на рис. 3.

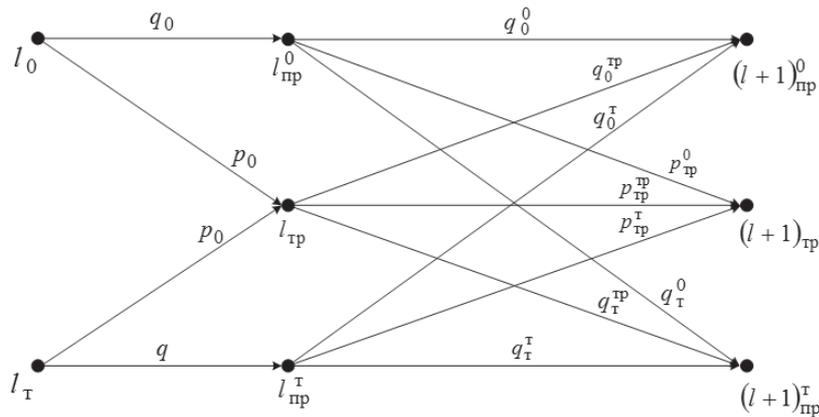


Рис. 3. Граф переходных вероятностей модели симметричного K -канала с ошибками трансформации

Уравнение математической модели:

$$q_0 \left(q_0^0 + q_{\tau}^0 + K p_{\text{TP}}^0 \right) + q \left(q_0^{\tau} + q_{\tau}^{\tau} + K p_{\text{TP}}^{\tau} \right) + p_0 \left(q_0^{\text{TP}} + q_{\tau}^{\text{TP}} + K p_{\text{TP}}^{\text{TP}} \right) = 1. \quad (9)$$

Граф на рис. 3 и обобщенное соотношение (9) в совокупности представляют собой математическую модель марковского симметричного ИК с ошибками трансформации.

По аналогии с предыдущим вариантом модели условные вероятности $q_0(l+1/l)$, $q(l+1/l)$, $p_0(l+1/l)$, $p_x(l+1/l)$ правильного приема нулевого, токового, трансформации, стирания соответственно для $(l+1)$ -го символа запишутся в виде



$(l + 1)$ -го символа запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} q_0(l + 1/l) &= q_0q_0^0 + qq_0^T + Kp_0q_0^{TP}, \\ q_T(l + 1/l) &= q_0q_T^0 + qq_T^T + Kp_0q_T^{TP}, \\ p_0(l + 1/l) &= q_0p_{TP}^0 + qp_{TP}^T + Kp_0p_{TP}^{TP}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Решая систему уравнений (10), можно получить формулы для определения безусловных вероятностей q_0, q, p_0 .

4. МОДЕЛЬ СИММЕТРИЧНОГО К-КАНАЛА С ОШИБКАМИ СТИРАНИЯ

Матрица P_c переходных вероятностей модели симметричного К-канала с ошибками стирания (без трансформаций) запишется в виде:

$$P_c = \begin{bmatrix} q_0^0 & q_T^0 & p_x^0 \\ q_0^T & q_T^T & p_x^T \\ q_0^x & q_T^x & p_x^x \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Граф переходных вероятностей модели (11) представлен на рис. 4.

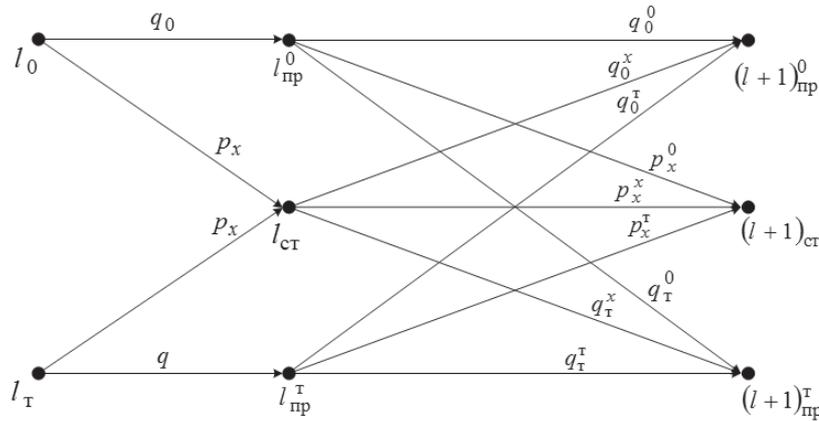


Рис. 4. Граф переходных вероятностей модели симметричного К-канала с ошибками стирания

Уравнение математической модели:

$$q_0 (q_0^0 + q_T^0 + Kp_x^0) + q (q_0^T + q_T^T + Kp_x^T) + p_0 (q_0^{TP} + q_T^{TP} + Kp_x^{TP}) = 1. \quad (12)$$

Граф на рис. 4 и уравнение (12) в совокупности представляют собой математическую модель марковского симметричного ИК с ошибками стирания.

По аналогии с предыдущим вариантом модели условные вероятности $q_0(l+1/l), q(l+1/l), p_0(l+1/l), p_x(l+1/l)$ правильного приема нулевого, токового, трансформации, стирания соответственно для $(l + 1)$ -го символа запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} q_0(l + 1/l) &= q_0q_0^0 + qq_0^T + Kp_xq_0^x, \\ q_x(l + 1/l) &= q_0q_x^0 + qq_x^T + Kp_xq_x^x, \\ p_x(l + 1/l) &= q_0p_x^0 + qp_x^T + Kp_xp_x^x. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решая систему уравнений (13), можно получить формулы для определения безусловных вероятностей q_0, q, p_x .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированные на базе простой модели Маркова варианты математических моделей несимметричных и симметричных информационных К-каналов с ошибками произвольного типа дают возможность более адекватного оценивания процессов передачи – приема информации в современных ответственных ЦСПИ. Как показали результаты проведенного моделирования, при синтезе систем,



работающих в условиях действия помех большой интенсивности, когда $i_{с.п.} = f_{с.п.}/f_{р.к.} \gg 1$ ($i_{с.п.}$, $f_{с.п.}$, $f_{р.к.}$ — средние значения интенсивности, частоты случайной импульсной помехи, частоты формирования рабочих кодовых слов в канале соответственно), вызывающих как ошибки трансформации, так и стирания, может быть обеспечена достоверность приема информации, превышающая минимально на порядок аналогичные показатели при использовании традиционных вариантов моделей ИК с памятью.

Библиографический список

1. Pimentel C., Blake F. Modeling Burst Channels Using Partitioned Fritchman's Markov Models // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1998. № 47. P. 885–899.
2. Васильев К. К. Математическое моделирование систем связи. Ульяновск : УлГТУ, 2008. 170 с.
3. Теория электрической связи : учеб. пособие для вузов / К. К. Васильев [и др.]. Ульяновск : УлГТУ, 2008. 452 с.
4. Гладких А. А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 380 с.
5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники : в 3 т. Т. 1. М. : Сов. радио, 1974. 552 с.
6. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М. : Сов. радио, 1970. 728 с.
7. L'vov A. A., Svetlov M. S., Ulyanina Yu. A. Analysis of pseudo-random sequences in the non-binary communication channels // Naukowa mysl informacyjnej powieki–2014. Techniczne nauki : Materialy X Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. Polska, Przemysl, 2014. P. 37–41.

Models of Information K -Channels with Memory

A. A. L'vov¹, M. S. Svetlov², Yu. A. Ulyanina¹

¹Saratov State Technical University named after Gagarin Yu. A., 77, Politechnicheskaya str., 410054, Saratov, Russia, alvova@mail.ru, ulyanina.ya@yandex.ru

²Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, svetlovms@yandex.ru

Analysis of non-binary (K -ary, $K \geq 3$) information channels (IC) with memory as complex stochastic structures is rather complicated mathematically. Of significant interest is the synthesis of simplified mathematical models for such channels that allow clarifying relatively simply the most important regularities occurring in real processes. Modeling of IC (K -channels) with memory is a vital problem that has both theoretical and practical importance. In this paper models of discrete K -channels with memory are presented, their graphs of transition probabilities for various operating conditions built, and probabilities of outcomes of reception for symbols of the used alphabet estimated.

Key words: K -channel, mathematical model, transition probability, unconditional probability.

References

1. Pimentel C., Blake F. Modeling Burst Channels Using Partitioned Fritchman's Markov Models. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1998, no 47, pp. 885–899.
2. Vasiliev K. K. *Matematicheskoe modelirovanie sistem svyazi* [Mathematical Modeling of Communication Systems]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Tech. Univ. Press, 2008, 170 p. (in Russian).
3. Vasiliev K. K. *Teoriia elektricheskoi svyazi* [Theory of telecommunications]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Tech. Univ. Press, 2008, 452 p. (in Russian).
4. Gladikh A. A. *Osnovy teorii miagkogo dekodirovaniia izbytochnykh kodov v stiraishchem kanale svyazi* [Fundamentals of the theory of soft decoding redundant codes in the erasure channel communication]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Tech. Univ. Press, 2010, 380 p. (in Russian).
5. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* [Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering]. Vol. 1. Moscow, Sov. Radio, 1974, 552 p. (in Russian).
6. Fink L. M. *Teoriia peredachi diskretnykh soobshchenii* [Theory of discrete message transmission]. Moscow, Sov. Radio, 1970, 728 p. (in Russian).
7. L'vov A. A., Svetlov M. S., Ulyanina Yu. A. Analysis of pseudo-random sequences in the non-binary communication channels. *Naukowa mysl informacyjnej powieki–2014. Techniczne nauki: Materialy X Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji*, Polska, Przemysl, 2014, p. 37–41.