

## СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ ПО КАНАЛАМ С ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

**В.Л. Хазан**, доцент кафедры ССИБ ОмГТУ, к.т.н.

**Д.В. Федосов**, зам. проректора по научной работе, доцент кафедры ССИБ ОмГТУ, к.т.н.

**Д.А. Корнеев**, аспирант ОмГТУ

**Введение.** При классической  $n$ -позиционной фазовой манипуляции (ФМ), когда возможные значения начальных фаз сигнала кратны  $360^\circ/n$ , на приемной стороне радиолинии нет возможности однозначно идентифицировать значения фаз, которые равны  $k \cdot 360^\circ/n$  при  $0 \leq k \leq (n - 1)$ . Это объясняется тем, что любое из  $n$  значений фазы сигнала на приемной стороне радиолинии может быть принято за нулевое, что приводит к неверной фазовой синхронизации приемника. Например, при двухпозиционной ФМ  $n = 2$ , и в этом случае на приемной стороне радиолинии можно наблюдать так называемую обратную работу, когда решение «единица» выносится при передаче символа «ноль», а решение «ноль» выносится при передаче символа «единица» [1, 2].

Широко известен способ приема ФМ-сигналов, предложенный Н.Т. Петровицем, который позволил исключить явление обратной работы и который заключается в том, что сравниваются фазы соседних элементарных посылок. Этот способ называется относительной фазовой манипуляцией (ОФМ) [1], или фазоразностной манипуляцией (ФРМ) [2].

При всех достоинствах ОФМ ее недостатком является то, что ошибки, которые появляются на выходе приемного устройства под влиянием помех, могут группироваться парами, что делает неэффективным, например, применение кодов, обнаруживающих и исправляющих только одиночные ошибки в кодовых комбинациях. При ОФМ необходимо использовать избыточные коды, способные обнаруживать и исправлять как одиночные, так и двойные смежные ошибки. Это требует дополнительной кодовой избыточности и приводит к соответствующему снижению скорости передачи сообщений [1].

При ФМ в отличие от ОФМ не происходит группирования ошибок, и в этом — существенное преимущество ФМ перед ОФМ. Избавиться же от случаев неверной фазовой синхронизации при ФМ возможно путем введения специальных дополнительных избыточных символов в кодовую комбинацию, которые несут в себе информацию о нулевой фазе сигнала [1]. При этом снижается скорость передачи сообщения, то есть уменьшается пропускная способность канала связи.

Однако избыточность в кодовые комбинации, как правило, все равно вводится для обнаружения ошибок. Легко проверить, что, например, при двухпозиционной ФМ и при нечетном числе элементов в знаке и одном избыточном символе проверки на четность или нечетность [3] можно одновременно обнаружить в кодовых комбинациях нечетное число ошибок, и наличие обратной работы. В этом случае на обнаружение обратной работы при приеме ФМ-сигналов не тратится дополнительная избыточность, и скорость передачи сообщений не снижается.

Если же изначально число информационных символов нечетно и равно, например, семи, как это имеет место в коде МТК-5, то символ проверки на четность или нечетность делает число элементов в кодовой комбинации четным, что не дает возможности одновременно обнаруживать нечетное чис-

ло ошибок и явление обратной работы на выходе демодулятора приемника.

До настоящего времени не было найдено достаточно надежного и рационального способа передачи сигналов с ФМ по радиоканалам, которые являются нестационарными и имеют неопределенную фазу [4].

Ниже описывается способ передачи сообщений методом ФМ, в котором при приеме сообщений объединяются задачи обнаружения ошибок с одновременным обнаружением возможной неверной фазовой синхронизации и достоверного декодирования сообщения.

### Обнаружение обратной работы при двухпозиционной ФМ.

В случае четного числа символов в кодовой комбинации (например, восьми) для организации нечетного числа символов, которые участвуют в проверке на четность или нечетность единиц или нулей, все время добавляется один дополнительный элемент. Он заимствуется из числа элементов преимущественно у соседних кодовых комбинаций (предшествующих или следующих за кодируемой последовательностью) и производится проверка на четность или нечетность в группе символов, содержащих в этом случае нечетное число элементов (в нашем примере с кодом МТК-5 — девяти элементов: семи — информационных, одного избыточного для проверки на четность и одного заимствованного у соседнего знака для обеспечения нечетности числа элементов, проверяемых на соответствие критерию качества).

Пусть, например, кодом КОИ-7 с семью информационными элементами в кодовой комбинации передается сообщение «Фазовая манипуляция» методом двухпозиционной фазовой манипуляции.

Кодируем это сообщение сначала без избыточности:

Фазовая

0110011 1000001 0101101 1111001 1110101 1000001 1000101

пробел

0000010

манипуляция

1011001 1000001 0111001 1001001 0000101 1010101 0011001

1000101 1100001 1001001 1000101

(пробелы между отдельными знаками в данном случае показаны для наглядности, а на самом деле отсутствуют).

Дополним сначала, как это обычно делается, каждую семиэлементную кодовую комбинацию восьмым избыточным элементом (в нашем случае для проверки на четность единиц):

01100110 10000010 01011010 11110011 11101011 10000010

10001011

00000101

10110010 10000010 01110010 10010011 00001010 10101010

00110011 10001011 11000011 10010011 10001011.

Если это сообщение передавать методом ФМ, то в случае, когда происходит фазовая рассинхронизация, на выходе демодулятора имеет место следующая последовательность

символов, которая соответствует варианту реализации обратной работы:

```
10011001 01111101 10100101 00001100 00010100 01111101
01110100
11111010
01001101 01111101 10001101 01101100 11110101 01010101
11001100 01110100 00111100 01101100 01110100.
```

Очевидно, что правило проверки на четность единиц в этом случае не нарушается, и приемник, не обнаружив ошибок, вынужден принять сообщение, которое не несет никакой информации.

Если же производится проверка на четность элементов текущего знака плюс один элемент, заимствованный, например, у предыдущей кодовой комбинации, то без избыточности кодовая последовательность выглядит следующим образом (заимствуемые для введения избыточности последние элементы знаков выделены в приведенном сообщении жирным шрифтом):

```
0* 0110011 1000001 0101101 1111001 1110101 1000001 1000101
0000010
1011001 1000001 0111001 1001001 0000101 1010101 0011001
1000101 1100001 1001001 1000101.
```

В результате при кодировании с привлечением последнего элемента предыдущего знака для проверки на четность единиц будет иметь место последовательность:

```
0 01100110 10000010 01011010 11110011 11101010 10000010
10001011
00000100
10110010 10000010 01110010 10010011 00001011 10101011
00110010 10001011 11000010 10010011 10001010.
```

Если в этом случае происходит фазовая рассинхронизация и имеет место обратная работа, то на выходе демодулятора реализуется следующая последовательность символов:

```
1 10011001 01111101 10100101 00001100 00010101 01111101
01110100
11111011
01001101 01111101 10001101 01101100 11110100 01010100
11001101 01110100 00111101 01101100 01110101.
```

Проверяя на приемном конце эту последовательность символов на четность числа единиц в каждой кодовой комбинации с учетом заимствованного у предыдущего знака девятого элемента, можно видеть, что абсолютно во всех знаках в данном сообщении не выполняется условие четности единиц. В этом случае все сообщение может быть инвертировано и после этого декодировано совершенно верно. Одновременно при появлении нечетного числа ошибок на отдельных интервалах, состоящих из девяти элементов, проверяемых на четность единиц, обнаруживаются ошибки, и соответствующие знаки «стираются» декодером, как недостоверные. В случае, если ошибка произошла в последнем символе знака, то, поскольку он участвует дважды в проверке на четность, стираются два соседних знака. Стертые знаки могут быть воспроизведены посредством переспроса по каналу обратной связи.

В рассмотренном примере введение одного избыточного символа в каждую кодовую комбинацию проверки на четность на интервале нечетного числа элементов позволяет сохранить основную его функцию обнаружения ошибок в отдельных кодовых комбинациях. Одновременно решается проблема обнаружения и ликвидации обратной работы при

двукратной ФМ, и обеспечивается тем самым когерентный прием ФМ-сигналов, который является наиболее помехоустойчивым из всех методов манипуляции [1]. Известно, например, что в одних и тех же условиях связи число ошибок при ФМ в два раза меньше, чем при ОФМ [5]. Очевидно, что в рассмотренном выше случае обнаружение обратной работы обеспечивает наиболее помехоустойчивую передачу сигнала и не требует ввода специальных избыточных символов, то есть скорость передачи сообщений при таком методе манипуляции не снижается.

**Явление обратной работы при многопозиционной ФМ.** При многократной фазовой телеграфии в случае неверной фазовой синхронизации обратная работа может возникать не при всех значениях фазы сигнала. Например, при четырехпозиционной фазовой манипуляции сообщение «11» передается гармоническим колебанием с фазой, равной нулю, сообщение «10» передается гармоническим колебанием с фазой, равной  $-90^\circ$ , сообщение «01» передается гармоническим колебанием с фазой, равной  $+90^\circ$ , а сообщение «00» — гармоническим колебанием с фазой, равной  $180^\circ$  (рис. 1, а). Если на приемном конце радиоприемника фаза сигнала  $+90^\circ$  ошибочно принимается за  $0^\circ$ , обратная работа реализуется только в одной половине передаваемой пары элементов, как показано на рис. 1, б. Здесь правильно принятые символы выделены жирным шрифтом, а в скобках указаны передаваемые символы. Аналогичная картина наблюдается, когда на приемном конце радиоприемника фаза  $-90^\circ$  ошибочно принимается за  $0^\circ$ , как показано на рис. 1, с. И только в случае, когда за  $0^\circ$  ошибочно принимается  $180^\circ$ , обратная работа реализуется во всех элементах (рис. 1, д).

Таким образом, очевидно, что в общем случае многопозиционной фазовой манипуляции, в зависимости от конкретной реализации ошибки при фазовой синхронизации, в кодовой комбинации может быть инвертировано различное число элементов. Один избыточный элемент способен обнаружить нечетное число инвертированных элементов в кодовой комбинации. Для обнаружения инверсии абсолютно всех символов кодовой комбинации с четным числом элементов, который называется обратной работой, целесообразно для кодирования с проверкой на четность единиц (или нулей) в этой кодовой комбинации заимствовать один элемент из кодовых комбинаций соседних знаков (или опережающего или запаздывающего), чтобы общее число элементов, подвергающееся проверке на четность, стало нечетным. Последний случай особенно важен при использовании наиболее поме-

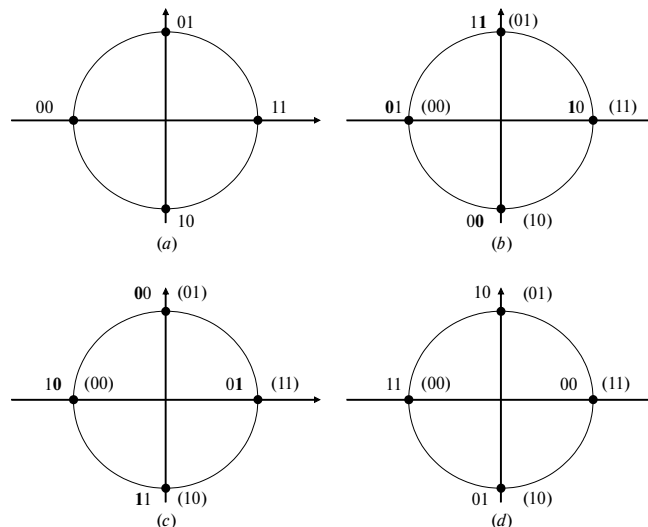


Рис. 1

\* Телеграмма в нашем случае при заимствовании последнего элемента предыдущего знака для проверки на четность должна начинаться дополнительно передаваемым символом «0» или «1», что позволяет закодировать по предлагаемому алгоритму первый знак сообщения.

хоустойчивой двухпозиционной ФМ, пример которой был рассмотрен выше.

Наиболее близким к рассматриваемому способу передачи сообщений методом фазовой манипуляции является метод, в котором когерентный прием ФМ-сигналов осуществляется детектором по алгоритму, описанному в [1], блок-схема которого изображена в этой монографии на рис. 1.8. Подобная блок-схема для случая четырехпозиционной ФМ, соответствующей рис. 1, воспроизводится на рис. 2 в качестве примера.

На рис. 2 введены следующие обозначения:

- 1 — вход демодулятора, на который подается напряжение  $U(t)$  с выхода усилительного тракта приемника;
- 2 — фазовый детектор, на выходе которого реализуется максимальное напряжение при передаче символов «11»;
- 3 — фазовый детектор, на выходе которого реализуется максимальное напряжение при передаче символов «01»;
- 4 — фазовый детектор, на выходе которого реализуется максимальное напряжение при передаче символов «00»;
- 5 — фазовый детектор, на выходе которого реализуется максимальное напряжение при передаче символов «10»;
- 6 — вход для опорного напряжения, имеющего начальную фазу  $0^\circ$ ;
- 7 — вход для опорного напряжения, имеющего начальную фазу  $90^\circ$ ;
- 8 — вход для опорного напряжения, имеющего начальную фазу  $180^\circ$ ;
- 9 — вход для опорного напряжения, имеющего начальную фазу  $-90^\circ$ ;
- 10 — схема сравнения уровней напряжений на выходах фазовых детекторов;
- 11 — индивидуальный выход схемы сравнения для решения «11»;
- 12 — индивидуальный выход схемы сравнения для решения «01»;
- 13 — индивидуальный выход схемы сравнения для решения «00»;
- 14 — индивидуальный выход схемы сравнения для решения «10»;
- 15 — схема «или»;
- 16 — результирующий выход демодулятора, с которого бинарная последовательность  $S(t)$  подается на декодер.

Сигнал  $U(t)$  с выхода усилительного тракта приемника подается на вход (1) демодулятора и поступает одновременно на все входы фазовых детекторов (2, 3, 4 и 5), каждый из которых соответствует определенной начальной фазе ( $0, 90^\circ, 180^\circ$  и  $-90^\circ$ ) опорного генератора, колебания которого с этими начальными фазами подаются на вторые входы этих фазовых детекторов (6, 7, 8 и 9). Схема сравнения (10) анализи-

рует уровни сигналов на выходах всех фазовых детекторов и принимает решение о принятых символах, которое выдается на ее соответствующий индивидуальный выход (11—14). Принятые схемой сравнения решения  $S(t)$  через схему «или» (15) поступают с выхода демодулятора (16) на вход декодера.

Как уже указывалось выше, подобная схема подвержена общему для ФМ недостатку — она в ходе передачи сообщения не способна идентифицировать однозначно положения для конкретных значений начальных фаз опорных напряжений. Поэтому на отдельных интервалах времени передаваемого сообщения начальные фазы опорных напряжений могут определяться ошибочно, и фрагменты сообщения на этих интервалах времени принимаются неверно. Очевидно, что в случае равновероятного принятия каждого положения фазы за нулевое при четырехпозиционной ФМ ошибочно будет приниматься 75% от общего числа знаков.

**Схема демодулятора для определения обратной работы при многопозиционной ФМ.** Для ликвидации вышеуказанного недостатка предлагается передавать сообщение с избыточными элементами, которые одновременно обнаруживают ошибки в кодовых комбинациях и обратную работу при ФМ, например, с избыточным элементом проверки на четность или нечетность единиц или нулей. При этом, если число элементов в кодовой комбинации четное, то для обнаружения обратной работы, когда в кодовой комбинации знака инвертируются все элементы, для приведения числа элементов, проверяемых на четность или нечетность единиц или нулей, к нечетному числу, заимствовать, как уже указывалось выше, один последний элемент от предшествующей кодовой комбинации или один первый элемент последующей кодовой комбинации.

При этом на приемном конце радиолинии в демодуляторе нужно продолжительном интервале времени, соответствующем достаточно большому числу знаков, анализируются все ситуации, которые возможны при неверном определении начальной фазы опорного напряжения и выбираются как верные только те решения демодулятора, которые удовлетворяют заданный критерий качества (в данном случае условие проверки на четность или нечетность единиц или нулей) на наиболее продолжительном интервале времени. Естественно, что при четном числе элементов в кодовой комбинации и предлагаемом методе кодирования интервал времени, на котором производится анализ на соответствие критерию качества, должен учитывать и дополнительный элемент, т. е. содержать анализируемое число знаков плюс один элемент.

Необходимо заметить, что схема, заимствованная из [1] и изображенная на рис. 2, может быть упрощена. Дело в том, что при многократной ФМ при кратности  $k$  число позиций фазы равно  $2^k$ . При этом половина позиций отличаются друг от друга по фазе на  $180^\circ$ . Фазовые детекторы, которые соответствуют опорным напряжениям, отличающимся на  $180^\circ$ , будут иметь одинаковые уровни и разные знаки. Очевидно, что в этом случае число каналов в детекторе может быть уменьшено в два раза.

Блок-схема демодулятора с учетом этого замечания и с предлагаемым алгоритмом работы приведена на рис. 3, где обозначено:

- 1 — вход демодулятора, на который подается напряжение  $U(t)$  с выхода усилительного тракта приемника;
- 2 — фазовый детектор для опорного напряжения с начальной фазой  $0^\circ$ ;
- 3 — фазовый детектор для опорного напряжения с начальной фазой  $90^\circ$ ;
- 4 — вход для опорного напряжения, имеющего начальную фазу  $0^\circ$ ;

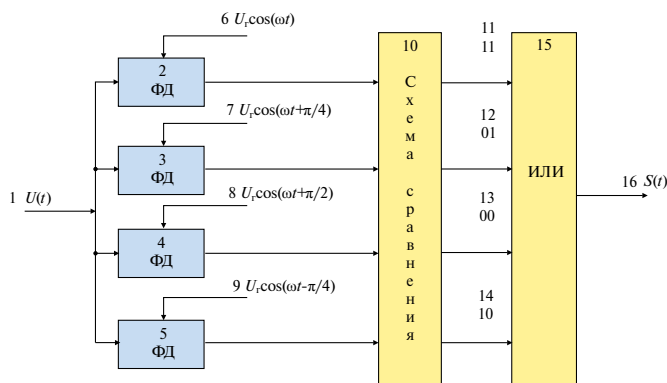


Рис. 2

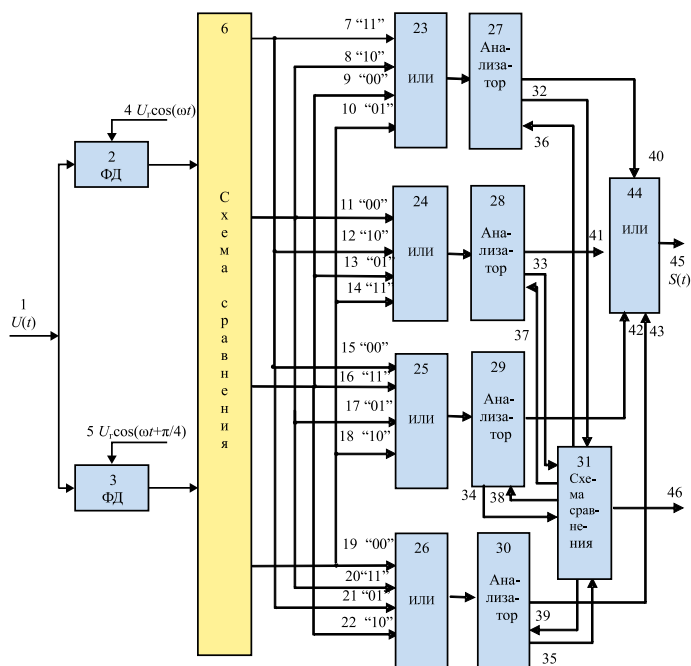


Рис. 3

5 — вход для опорного напряжения, имеющего начальную фазу  $90^\circ$ ;

6 — схема сравнения уровней и полярностей напряжений на выходах фазовых детекторов;

7—22 — входы схем «или»;

23—26 — схемы «или»;

27—30 — анализаторы соответствия информационных потоков критерию качества;

31 — схема сравнения;

32—35 — выходы с анализаторов на схему сравнения для оценок критерия качества сигналов;

36—39 — выходы со схемы сравнения для сигналов управления анализаторами;

40—43 — выходы анализаторов для информационных сигналов;

44 — схема «или»;

45 — выход демодулятора, по которому сообщение, удовлетворяющее наиболее полно критерий качества, транслируется на вход декодера;

46 — выход для импульсов цикловой синхронизации, подаваемых на вход декодера.

Сигнал  $U(t)$  с выхода усилительного тракта приемника подается на вход (1) демодулятора и поступает одновременно на входы фазовых детекторов (2) и (3). На второй вход фазового детектора (2) подается опорное напряжение (4) с начальной фазой, равной  $0^\circ$ . На второй вход фазового детектора (3) подается опорное напряжение (5) с начальной фазой, равной  $90^\circ$ . Схема сравнения (6) анализирует уровни и полярности сигналов на выходах обоих фазовых детекторов и выносит решение о принятых символах. Если максимальное по модулю напряжение поступает с фазового детектора (2) и имеет положительную полярность, то принимаются все возможные решения о принятых символах «11», «10», «00» и «01». Если максимальное по модулю напряжение поступает с фазового детектора (3) и имеет отрицательную полярность, то принимаются все возможные решения о принятых символах «00», «01», «11» и «10». Если максимальное по модулю напряжение поступает с фазового детектора (2) и имеет отрицательную полярность, то принимаются все возможные решения о принятых символах «10», «11» и «00». И, наконец, если макси-

мальное по модулю напряжение поступает с фазового детектора (3) и имеет отрицательную полярность, то принимаются все возможные решения о принятых символах «10», «00», «01» и «11». Принятые схемой сравнения (6) решения группируются на ее выходах (7—22), и полученные бинарные последовательности подаются на входы четырех схем «или» (23—26). При этом, если схемой сравнения (6) принято решение «11», которое поступает на схему «или» (23), то на схему «или» (24) подается решение в виде «10» (12), а на схему «или» (25) — в виде «00» (15) и, наконец, на схему «или» (26) в виде «01» (21). Аналогичная манипуляция осуществляется и с другими выходами схемы сравнения. Выходы всех схем «или» анализируются на предмет соответствия критерию качества, а именно, на отсутствие ошибок, в том числе на отсутствие обратной работы. Очевидно, что один из выходов схем «или» (23—26), который соответствует одному из возможных значений начальной фазы опорного напряжения, должен наиболее полно удовлетворять требованию соответствия критерию качества, т. е. представлять собой при отсутствии ошибок правильно принятое сообщение. Этот выход и обнаруживается анализаторами соответствия критерию качества (27—30) и схемой сравнения (31), на которую подаются результаты анализа на соответствие критерию качества (32—39). Она с помощью сигналов управления (36—39) руководит информационными выходами анализаторов (40—43), по которым информационный сигнал поступает на схему «или» (44) и затем с ее выхода (45) транслируется на вход декодера.

Одновременно с принятием решения о выборе сигнала, который наилучшим образом соответствует критерию качества, с выхода схемы сравнения (46) поступает сигнал, который может быть использован для цикловой синхронизации.

Критерий качества должен удовлетворяться на интервале времени, содержащем достаточно большое количество знаков.

В качестве примера рассмотрим возможный алгоритм работы одного из четырех анализаторов соответствия критерию качества (27—30), входящих в состав демодулятора. Блок-схема такого анализатора соответствия критерию качества изображена на рис. 4. В данном случае алгоритм работы анализатора предполагает передачу сообщения 8-элементным кодом с проверкой на четность «1» или «0» девяти элементов сообщения (с привлечением к проверке на четность последнего элемента предшествующего знака).

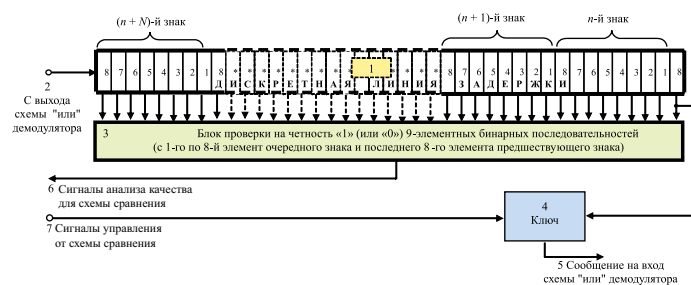


Рис. 4

На рисунке обозначено:

1 — дискретная линия задержки на  $N$  знаков плюс один элемент;

2 — вход линии задержки;

3 — блок проверки на четность «1» или «0» кодовых комбинаций на интервале  $N$  знаков плюс один элемент;

4 — управляемый ключ;

5 — информационный выход анализатора соответствия критерию качества;



6 — выход, по которому сигналы соответствия критерию качества поступают на схему сравнения демодулятора;

7 — вход для сигналов управления от схемы сравнения.

Последовательность элементов сообщения поступает на вход (2) дискретной линии задержки (1) анализатора соответствия критерию качества с выхода соответствующей схемы «или» демодулятора. На рисунке вдоль линии задержки (1) цифрами обозначены номера элементов в кодовых комбинациях, которые помещены в эту линию задержки. С приходом очередного элемента вся последовательность в линии задержки сдвигается вправо на один элемент и блоком проверки на четность (3) осуществляется проверка выполнения условия четности или нечетности единиц (или нулей) во всех кодовых последовательностях элементов (в данном случае с учетом последнего элемента предшествующего знака). Результаты анализа на соответствие критерию качества с блока (3) поступают через выход (6) на схему сравнения результатов всех анализаторов. С выхода дискретной линии задержки сообщение подается на управляемый ключ (4), который пропускает или не пропускает на выход очередную кодовую комбинацию. Ключ (4) управляется с входа (7) сигналами, которые поступают от схемы сравнения результатов анализа. Если проверка на четность удовлетворяется в данной линии задержки в одном из положений, которое соответствует какому-либо номеру элемента кодовой комбинации, на наибольшем участке от конца линии задержки, чем у остальных анализаторов, или, по крайней мере, не на меньшем участке, чем у остальных анализаторов, то ключ (4) открывается, и бинарная последовательность, которая соответствует одной кодовой комбинации, подается с выхода канала анализатора соответствия критерию качества (5) на схему «или», включенную на выходе демодулятора.

Вероятность  $P_{ч}$  выполнения условия четности случайно на длительности одной кодовой комбинации на шумах (в дежурном режиме) или при приеме в положении, которое не соответствует границам цикла (кодовой комбинации), равна 0,5. Вероятность выполнения условия четности  $P_{ч}$  на длительности  $N$  знаков при случайной бинарной последовательности соответственно равна  $0,5^N$ . В таблице приведена зависимость вероятности выполнения условия четности  $P_{ч}$  на интервале  $N$  знаков в зависимости от  $N \leq 11$ .

Очевидно, что каким бы большим ни было число  $N$ , всегда остается какая-то вероятность того, что на длительности  $N$  знаков сигнал положительной оценки соответствия критерию качества может поступить с выходов двух или большего числа анализаторов. Во избежание такой критической ситуации на выходе демодулятора включается схема «или», которая пропускает сигнал с выхода, например, лишь того анализатора, с которого он поступал до этого момента времени.

Анализатор соответствия критерию качества может одновременно использоваться и для цикловой синхронизации декодера, поскольку он определяет

момент выполнения условия удовлетворения критерия качества в знаках на достаточно большом интервале бинарной последовательности, то есть с достаточно большой степенью вероятности определяет начало принимаемой в данный момент кодовой комбинации. Таким образом, предлагаемый способ передачи сообщений методом ФМ автоматически обеспечивает и цикловую синхронизацию декодера, что важно для многоручевых каналов связи при высокой скорости манипуляции, когда из-за «вставок» и «выпадов» отдельных элементов в момент смены независимо замирающих лучей может происходить цикловая рассинхронизация.

**Компьютерная имитационная модель передачи цифровых сообщений при двухпозиционной ФМ.** Предлагаемый алгоритм передачи сообщений методом ФМ был проверен для двухпозиционной ФМ на компьютерной имитационной модели и полностью подтвердил свою работоспособность.

Общая блок-схема программы приведена на рис. 5.

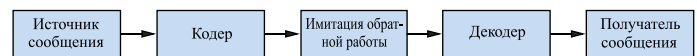


Рис. 5

Источник и получатель сообщения представляют собой входную и выходную строки данных соответственно. Рабочее окно программы изображено на рис. 6 для трех возможных различных позиций инверсии фазы, которая при обычной фазовой манипуляции приводит к обратной работе.

В программе используется стандартный телеграфный код МТК-5 с дополнительным восьмым элементом проверки на четность единиц. После набора сообщения строка знаков поступает на вход кодера, который в данной программе выполняет следующие функции: формирует для каждого знака сообщения соответствующую семиэлементную кодовую комбинацию, добавляет в конце каждой кодовой комбинации один избыточный элемент для проверки на четность единиц с учетом последнего, в данном случае избыточного, элемента предшествующей кодовой комбинации («исходное сообщение» на рис. 6). В итоге исходное сообщение представляет собой двумерный массив, в котором число строк равно числу знаков (19), а число столбцов — числу элементов в кодовой комбинации (8). Восьмой столбец включает проверочные эле-

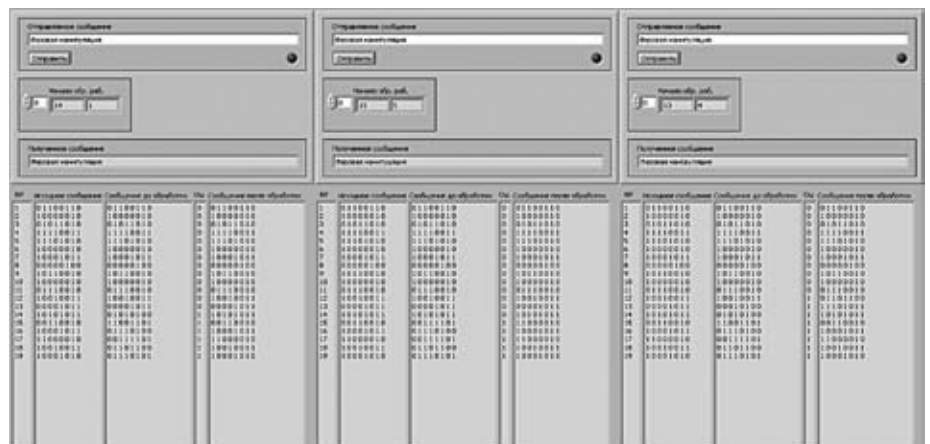


Рис. 6

Таблица

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{ч}$	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,03125	0,03125	0,0156	0,0078	0,0039	0,00195	0,00098

менты. В нашем случае в качестве первого (дополнительного) элемента передается символ «0».

После кодирования битовая последовательность поступает на блок имитации инверсии фазы сообщения, с помощью которого часть сообщения инвертируется. Момент начала инверсии выбирается произвольно, например, как показано на рис. 6, где «0» в столбце «Ош» соответствует точной фазовой синхронизации, а «1» в столбце «Ош» — факту инверсии фазы на соответствующей части сообщения.

Сформированная таким образом битовая последовательность поступает на декодер, который выполняет следующие функции: обнаруживает фрагменты сообщения, которые не удовлетворяют критерию качества, инвертирует бинарную последовательность, которая соответствует этим фрагментам сообщения («Сообщение после обработки» на рис. 6) и декодирует преобразованную последовательность элементов сообщения в последовательность знаков («полученное сообщение» на рис. 6).

На рис. 6, как пример, имитируется передача сообщения «Фазовая манипуляция». В случае, когда инверсия фазы происходит между знаками, все знаки принимаются правильно (левый фрагмент рис. 6). Если инверсия фазы происходит на нечетном элементе знака, то один знак принимается неправильно (центральный фрагмент рис. 6). Если инверсия фазы

происходит на четном элементе знака, то неправильно принимаются два знака (правый фрагмент рис. 6).

Для гарантированной ликвидации ошибочно принятых знаков необходимо по каналу обратной связи переспрашивать у передающей стороны радиoliniии два знака в каждом случае обнаруженной инверсии фазы — один знак до момента инверсии, а другой знак — после момента инверсии. При отсутствии канала обратной связи знаки, граничащие справа и слева с моментом обнаруженной инверсии фазы, должны быть стертые.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Петрович Н.Т.** Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией. — М.: Сов. радио, 1965.
2. **Заездный А.М., Окунев Ю.Б., Рахович Л.М.** Фазоразностная модуляция и ее применение для передачи дискретной информации. — М.: Связь, 1967.
3. **Стеклов В.К.** Телеграфия и системы передачи данных. — М.: Радио и связь, 1988.
4. **Петрович Н.Т.** Относительные методы передачи информации. — М.: Книга-М, 2003.
5. **Финк Л.М.** Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1970.

Получено 19.12.07

#### РЕЦЕНЗИЯ

### ПОЛЕЗНАЯ КНИГА ПО МЕТОДАМ АНАЛИЗА И РАСЧЕТА МСС

**В.А. Наумов, К.Е. Самуйлов, Н.В. Яр-кина**

«Теория телетрафика мультисервисных сетей»

М.: Изд-во РУДН, 2007. — 191 с. с ил.

В конце XX века была разработана технология широкополосных сетей, что привело к внедрению новых телекоммуникационных услуг и появлению мультисервисных сетей связи (МСС). Для координации усилий производителей, продавцов программно-аппаратных средств и поставщиков услуг МСС в 1988 г. был создан международный форум MSF (Multiservice Switching Forum).

Рядом фирм и университетов различных стран был проделан огромный объем научно-исследовательской работы, проведено большое число международных научных конференций, на которых теоретики и практики совместно обсуждали вопросы построения и перспективы развития МСС. Поскольку основной проблемой МСС является качество предоставляемых услуг, то важнейшей задачей становится разработка соответствующих методов анализа и расчета показателей их качества. Большой вклад в создание теоретических основ этого направления сделали как зарубежные, так и отечественные математики и инженеры-связисты.

Фундаментальные результаты в области МСС с одноадресными соединениями в конце XX века получили Ф. Келли и К. Росс. В России большой вклад в теорию развития МСС внесли В.С. Лагутин и С.Н. Степанов своей монографией «Телетрафик мультисервисных сетей связи», вышедшей в 2000 г., и ряд других авторов.

В начале XXI века появились первые работы по анализу МСС с многоадресными соеди-

нениями, выполненные почти одновременно под руководством Й. Виртамо в Технологическом университете г. Хельсинки и под руководством К.Е. Самуйлова на кафедре «Системы телекоммуникаций» РУДН. Хотя модели МСС, полученные в этих научных группах, и различны, функционирование СМО в них представляется в виде обратимого марковского процесса с мультипликативным равновесным распределением вероятностей состояний, что в принципе облегчает построение эффективных вычислительных алгоритмов. Однако в модели Й. Виртамо трафик одноадресных соединений рассматривается как фоновый по отношению к трафику многоадресных соединений. Кроме того, в ней не учитываются свойства одноадресных соединений и отсутствуют эффективные вычислительные алгоритмы.

Насколько рецензенту известно, в 2003—2006 гг. исследования математических моделей МСС с полным учетом особенностей одновременного обслуживания одно- и многоадресных соединений проводились только на кафедре «Системы телекоммуникаций» РУДН научной группой профессора К.Е. Самуйлова. Изложению этих результатов и посвящается рецензируемая книга.

В первой главе книги представлен подход к классификации трафика мультисервисных сетей, описаны его основные характеристики. Во второй — исследуются модели МСС с одноадресными соединениями, представлен метод приближенной оценки вероятностей блокировки на основе моментов нагрузки, создаваемой входящими потоками запросов. Третья глава посвящена построению моделей сети мультимедиа, т. е. только сети с многоадресными соединениями. В четвертой главе рассматриваются сети с одноадресными и многоадресными соединениями

совместно. В ней представлены модель сети произвольной топологии, модели отдельного полнодоступного и неполнодоступного звена, рассматриваются методы точного расчета вероятностных характеристик моделей. Разработке приближенных численных методов анализа моделей МСС посвящена пятая глава книги. В заключительной, шестой главе, приведены примеры численного анализа моделей МСС и обсуждается эффективность рассмотренных методов расчета.

Особый интерес для приложений имеет глава 5 о методах численного анализа МСС произвольной топологии и глава 6, содержащая примеры численного анализа близких к реальности моделей как отдельного звена МСС, так и сети в целом.

В качестве недостатка книги следует отметить, что с точки зрения приложений и учебного процесса было бы целесообразно привести примеры численного анализа не только в заключительной главе для самых общих моделей МСС, но и для их частных случаев в соответствующих главах книги.

Компактное и четкое изложение методов и алгоритмов расчета вероятностно-временных характеристик МСС, основанных на теории марковских процессов с мультипликативным распределением вероятностей состояний и математической теории телетрафика, позволяет использовать книгу и как учебное пособие для старшекурсников и аспирантов профильных кафедр. Она будет полезна для инженеров-исследователей с хорошей математической подготовкой, специалистов исследовательских подразделений операторов связи и преподавателей ряда смежных специальностей.

**Г.П. Башарин,**

Заслуженный деятель науки РФ,  
профессор