

# Способы потактового кодирования при передаче групп синхронных цифровых каналов в ВОСП-WDM

Предложены способы построения оборудования ВОСП со спектральным мультиплексированием (ВОСП-WDM) для передачи групп синхронных цифровых каналов методом потактового кодирования входного распределения битовых символов в передаваемой группе.

Даны оценки потенциальных возможностей различных режимов работы и соответствующих требований к основным оптоэлектронным узлам на передающем и приемном терминалах. Отмечены технико-экономические преимущества, которые ожидаются при использовании предложенного способа передачи.

Игорь ЛУКИН,

к. т. н.

Владислав УДОВИЧЕНКО,

к. т. н.

Сергей ЛЕБЕДЕВ

Игорь ТОЛСТИХИН

## Введение

Успехи в разработке новых устройств высокоскоростной интегральной оптоэлектроники [1–3], многоволновых синтезаторов ансамбля высокостабильных генераторов сетки оптических несущих для передающего оборудования DWDM-систем [5] открывают возможность реализации нестандартных способов передачи многоканальных сигналов при некоторых частных случаях структур линейного

сигнала, но нередко встречающихся на практике. Например, при формировании трафика ВОСП-WDM часто возникает необходимость передачи по линейному тракту такой системы группы  $N$  синхронных цифровых каналов (СЦК), например каналов STM-4 или STM-16. При использовании обычных типов оборудования можно мультиплексировать группы СЦК либо способом TDM (с соответствующим повышением тактовой скорости линейного сигнала и требований к активному

оптоэлектронному оборудованию, а, следовательно, и стоимости системы), либо способом WDM, при котором число  $m$  мультиплексируемых оптических каналов должно быть равно числу  $N$  СЦК в группе,  $m = N$ , то есть каждый СЦК обеспечивается своим индивидуальным комплектом оборудования.

Однако объем каналообразующего оборудования — это не самая серьезная проблема в многоканальных системах с WDM, особенно магистрального типа. С ростом объема передаваемого трафика, то есть с увеличением числа  $N$ , все больше начинает сказываться ограничение допустимой мощности канальных оптических сигналов в составе линейного сигнала, а также влияние принципиально неустранимых нелинейных эффектов в волоконно-оптическом тракте. Таким образом, число одновременно передаваемых оптических сигналов в системах с WDM является критичным параметром для улучшения качества передачи.

Мы рассмотрим здесь в порядке предложения для обсуждения возможность использования, в дополнение к традиционным способам передачи, способа, основанного на использовании потактового кодирования битовых комбинаций, то есть совокупностей нулевых и единичных посылок, образующихся на выходе группы  $N$  СЦК, подводимой к входу мультиплексирующего оборудования. При таком кодировании оказывается возможным передавать на каждом тактовом интервале меньшее число оптических несущих  $m$ , чем число  $N$  передаваемых СЦК, а, следовательно, повысить мощность передаваемых символов, при одновременном уменьшении искажений вследствие нелинейных эффектов.

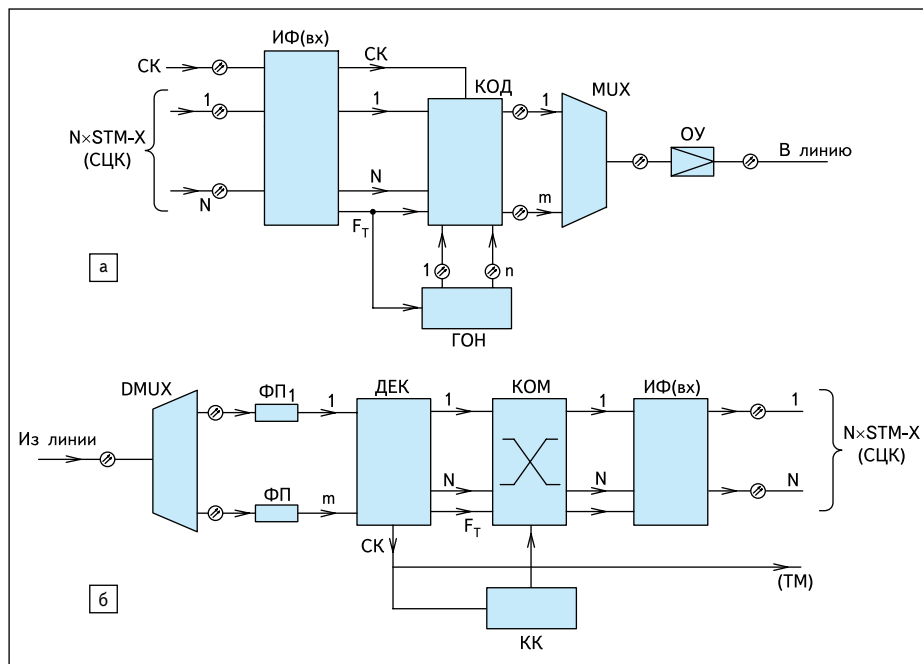


Рис. 1. Обобщенные структурные схемы оборудования ВОСП-WDM для передачи групп СЦК методом потактового кодирования комбинации оптических несущих: а) передающего терминала; б) приемного терминала

Пусть на вход системы (рис. 1) подводится группа  $N$ -синхронных каналов. Очевидно, число возможных комбинаций двоичных символов, образующихся на каждом тактовом интервале, составляет при этом  $2^N$ . При использовании обычной технологии спектрального мультиплексирования нам понадобилось бы организовать  $m = N$  отдельных оптических каналов в составе линейного сигнала. При этом все передатчики должны работать одновременно, и средняя мощность каждого канального передатчика ограничена в соответствии с максимально допустимым уровнем общей мощности линейного сигнала.

Если все СЦК, передаваемые по линии, синхронизированы общей тактовой частотой, можно использовать это их свойство для реализации другого способа мультиплексирования — методом потактового кодирования комбинации оптических несущих, число которых при одновременной передаче по волокну значительно меньше, чем при обычном спектральном мультиплексировании.

Рассмотрим два варианта реализации передачи методом потактового кодирования.

### Кодирование посредством комбинации оптических несущих в составе WDM-сигнала

В основе предлагаемого способа, позволяющего обеспечить передачу каждой тактовой комбинации символов в группе  $N$ -синхронных цифровых каналов, лежит принцип сопоставления каждой из  $2^N$  таких комбинаций некоторой определенной комбинации  $m$  оптических несущих, выбираемой из множества  $n$  генерируемых на передающем конце оптических несущих, причем  $m < N$ , а  $n > N$ . Число возможных тактовых комбинаций, передаваемых по  $m$  оптическим каналам, составляет  $C_T = A_n^m$ , где  $A_n^m = (n!)/(n-m)!$  — число размещений из  $n$  элементов по  $m$ . И для решения в принципе поставленной задачи достаточно обеспечить выполнение условия:

$$C_T = A_n^m \geq 2^N, \quad (1)$$

а на практике должно удовлетворяться именно неравенство, тогда избыточность, то есть количество «резервных» комбинаций  $A_n^m - 2^N = C_{ТМ}$ , может быть использовано для передачи параллельно с основным трафиком ( $N \times$ СЦК) еще и сервисной информации (коммутация, телемеханика, служебная связь).

Процесс кодирования исходных тактовых комбинаций, то есть однозначного отображения  $N$ -символьной входной комбинации в  $m$ -канальную комбинацию, образующую тактовый линейный сигнал, выполняется на основе таблицы соответствия, определяющей работу кодера передатчика.

Рассмотрим в самом общем виде состав оборудования и последовательность операций в системе ВОСП-WDM для передачи

группы ( $N \times$ СЦК) методом потактового кодирования.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

- $N \times$ STM- $X$  — группа СЦК, образованных синхронными транспортными модулями STM- $X$  ( $X = 1, 4, 16$ ).
- ИФ(вх) — входной интерфейс системы, устройство ввода в терминал  $N$ -канальной синхронной группы и сигналов сервисного канала (СК), включающего информацию телемеханики (ТМ) и коммутации (в случае требований перегруппировки входных СЦК на приемном терминале).
- $F_T$  — сигнал тактовой синхронизации.
- ГОН — генератор оптических несущих, устройство, обеспечивающее непрерывную генерацию  $n$  рабочих длин волн, соответствующих стандартной сетке МСЭ-Т G.694 и применяемым в аппаратуре данной системы спектрально-селективным компонентам (WDM-мультиплексорам и демультиплексорам).
- КОД — кодер входных тактовых комбинаций, устройство, обеспечивающее «отображение» комбинации  $N$  входных символов («нулей» и «единиц»), образующейся в течение каждого тактового интервала на входе кодера, в однозначно соответствующее этой комбинации сочетание  $m$  оптических несущих из набора  $\lambda_1 \dots \lambda_n$ . Это сочетание и передается далее как линейный оптический WDM-сигнал на данном тактовом интервале.
- MUX — оптический DWDM-мультиплексор, устройство, обеспечивающее объединение в общем тракте  $m$  оптических несущих, образующих тактовую кодовую комбинацию, сформированную кодером.
- ОУ — выходной оптический усилитель (бустер), обеспечивающий для всех оптических несущих ( $\lambda_1 \dots \lambda_n$ ) уровень мощности на выходе передающего терминала, соответствующий требованиям к ВОСП-WDM.
- DMUX — демультиплексор принятого линейного WDM-сигнала, устройство, обеспечивающее разделение сигнала тактовой посылки по длинам волн перед подачей на линейку фотоприемников.
- ФП $_1 \dots$ ФП $_m$  — линейка фотоприемников, детектирующая переданную на каждом тактовом интервале кодовую комбинацию оптических несущих и передающая эту информацию на входные порты декодера ДЕК. Спектральная характеристика фотодетекторов у этих приемников должна обеспечивать равную чувствительность во всем диапазоне ( $\lambda_1 \dots \lambda_n$ ).
- ДЕК — декодер тактовых кодовых комбинаций, устройство, обеспечивающее «обратное отображение» принятой кодовой комбинации оптических несущих в однозначно соответствующее ей распределение двоичных символов в выходном сигнале группы ( $N \times$ СЦК).

- КОМ — коммутатор синхронных цифровых каналов, передаваемых в составе  $N$ -канальной группы: устройство, обеспечивающее неблокирующую коммутацию  $N \times N$  каналов, принятых от передающего терминала. На рис. 1 подразумевается применение электронного коммутатора СЦК, но он может быть выполнен и в оптическом варианте. В этом случае как сам коммутатор КОМ, так и управляющий им контроллер КК включаются на выходе ИФ(вх), а ИФ(вых) подключается непосредственно к выходным портам декодера ДЕК.
- КК — контроллер коммутатора КОМ, устройство, обеспечивающее преобразование сигналов коммутации, вырабатываемых дешифратором СК сигналов сервисного канала в составе ДЕК, в исполнительные команды, управляющие состоянием коммутатора, определяющего в свою очередь перегруппировку каналов в составе группы.

Для оценки потенциальных возможностей передачи групп СЦК  $N \times$ STM- $X$  и соответствующих требований к основным функциональным узлам аппаратуры рассмотрим данные таблицы 1, полученные с использованием соотношения (1).

Таблица 1. Данные, полученные с использованием соотношения  $m = 2$

N	n	СТ	СТМ, ресурс для СК
4	5	20	4
5	7	42	50
6	9	72	8
7	12	132	4
8	18	306	50
9	24	552	40
10	33	1056	32

Судя по таблице 1, для передачи тактовыми комбинациями по две оптических несущих ( $m = 2$ ) группы СЦК с  $N = 4$  в принципе достаточно использовать ГОН с 5 DWDM-излучателями. Функциональный результат примерно эквивалентен применению мукспондера, например, типа ТМ-ОС48D, выпускаемого фирмой MRV для платформы Lambda Driver [4], но в рассматриваемой нами системе, то есть при кодовой передаче входных СЦК, битовая скорость линейного сигнала остается такой же, как у входных СЦК, а кроме того, передается еще сервисный канал СК.

Для передачи восьми агрегируемых каналов, то есть  $N = 8$ , при  $m = 2$  потребовалось бы уже  $n = 18$ , то есть требования к ГОН значительно повышаются. При таком числе DWDM-несущих можно рассматривать как более целесообразное решение построение ГОН по схеме генератора суперконтинуума [5], которая считается наиболее перспективной для создания многоволновых генераторов стабильных оптических несущих в DWDM-системах нового поколения.

В качестве собственно излучающего устройства в генераторе суперконтинуума (рис. 2) используется импульсный лазер ИЛ,

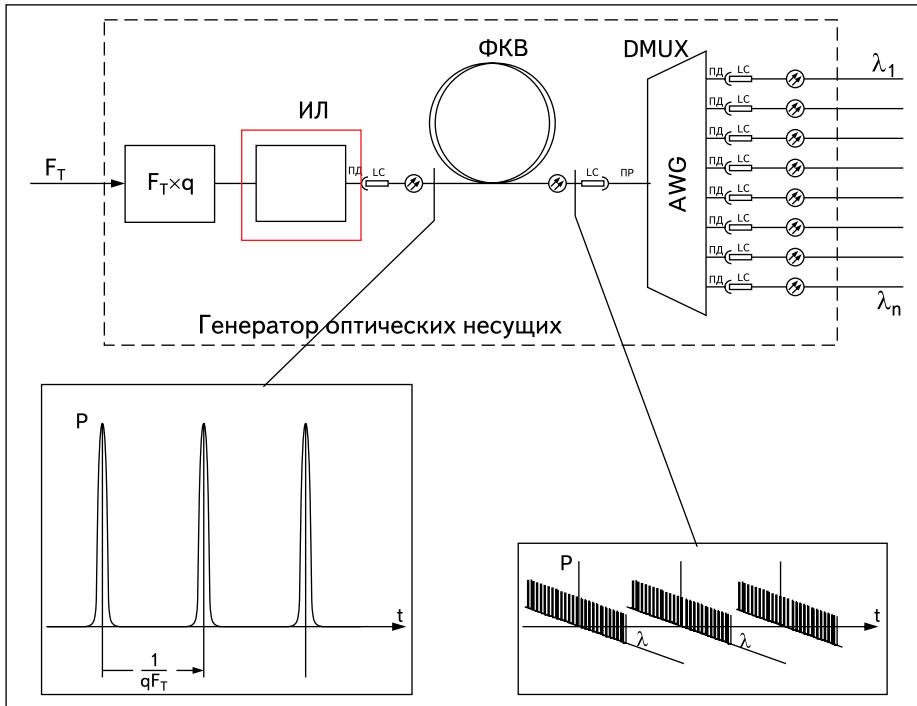


Рис. 2. Блок-схема и принцип работы генератора суперконтинуума

генерирующий достаточно мощные, ультракороткие (желательно фемтосекундные) импульсы с частотой  $q \times F_T$  (рис. 2), здесь  $q$  — коэффициент умножения тактовой частоты.

Выходные импульсы ИЛ вводятся в специальное (фотонно-кристаллическое) волокно ФКВ, характеризующееся очень высокой нелинейностью. Такие волокна в настоящее время разработаны и выпускаются промышленностью, в том числе и российской [8]. В результате прохождения сквозь сильно нелинейную среду ФКВ импульс преобразуется в спектр суперконтинуума (рис. 2), приблизительно так же, как дельта-импульс после Фурье-преобразования. Преобразованное излучение подается на вход стандартного DWDM-демультиплексора (например, AWG-типа [9]), и при выполнении условия  $\Delta v_{DMUX} < q \times F_T$ , а оно может быть обеспечено соответствующим выбором коэффициента  $q$  в умножителе тактовой частоты, в выходных каналах DMUX AWG будет получен набор непрерывных оптических несущих  $\lambda_1 \dots \lambda_n$ , число и расположение которых определяются системными требованиями. В частности, все  $\lambda_i$  должны лежать в рабочем диапазоне выходного бустер-усилителя ОУ. Конечно, при малом числе  $n$  в составе ГОН могут применяться обычные лазеры с требуемыми значениями стабилизированной длины излучаемых волн. Отметим, что при данном способе построения WDM-системы модулировать лазеры вообще не нужно, они работают в непрерывном режиме, а переключение оптических несущих осуществляется при формировании тактовых комбинаций, посредством интегрально-оптического переключающего узла, входящего в состав кодера КОД.

Входной интерфейс системы ИФ(вх) представляет собой, по существу, линейку  $N$  индивидуальных фотоприемных устройств для агрегируемых СЦК и устройство формирования сигнала тактовой частоты  $F_T$ . Выходные электрические сигналы этих устройств подключаются к соответствующим входным электронным портам кодера КОД, и дополнительно подводится сигнал служебного канала (телемеханика и коммутация каналов в группе на приемном конце).

Ключевым и, по-видимому, наиболее технологически изощренным узлом в составе передающего оборудования обсуждаемого комплекса является кодер КОД, функцией которого является отображение входных электронных тактовых комбинаций в однозначно соответствующие оптические сочетания DWDM-несущих, передаваемые в линию. Работа кодера, обобщенная схема которого

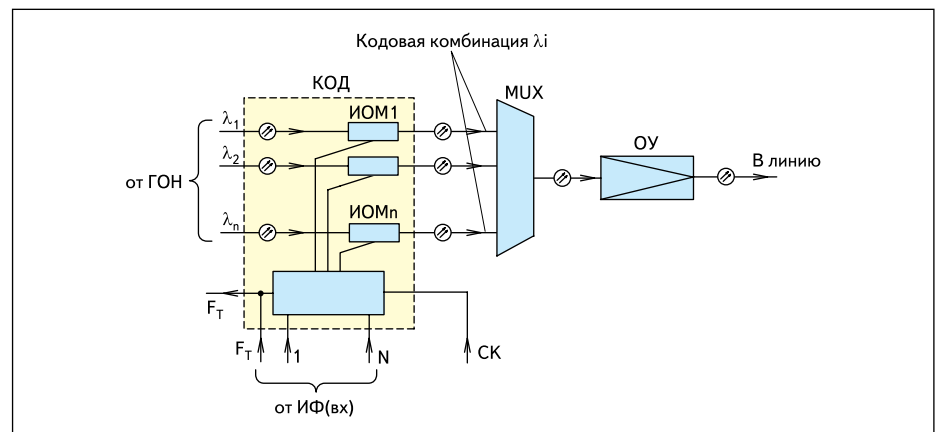


Рис. 3. Обобщенная схема КОД в составе передающего оборудования

показана на рис. 3, представляется следующим образом. В течение тактового интервала, задаваемого  $F_T$ , быстродействующая электронная схема отображения (ЭСО) вырабатывает, согласно введенной в память ЭСО таблице кодирования, сигнал формирования оптической комбинации, соответствующей кодируемому тактовому  $N$ -распределению. При наличии на входном порте ЭСО служебного сигнала СК, входящего от системы телемеханики, комбинация  $\lambda_i$  формируется уже с учетом этого сигнала (при этом используется СТМ, ресурс для СК, табл. 1). В конце тактового интервала сигнал тактовой комбинации подается на линейку интегрально-оптических модуляторов, формирующих эту комбинацию из набора оптических несущих, поступающих от ГОН; производится сброс предыдущих значений  $N$ -распределения и формируется отображение для следующего такта.

Тактовые группы импульсов мультиплексором MUX объединяются в общий тракт, усиливаются до необходимого уровня выходной мощности передатчика и поступают в волоконно-оптический линейный кабель.

Работа оборудования на приемном терминале производится в порядке выполнения обратных операций, и пояснений, как мы считаем, не требуется.

Режим формирования двухволновых тактовых комбинаций требует, как мы видели, использования большого числа  $n$  рабочих длин волн при увеличении количества  $N$  мультиплексируемых СЦК в составе группы. Можно смягчить эти требования, работая с большим числом оптических несущих  $\lambda_i$  в тактовой комбинации. Рассмотрим случай  $m = 4$  (табл. 2).

Таблица 2. Данные, полученные с использованием соотношения  $m = 4$

N	n	СТ	Ресурс для СК
8	6	360	104
10	8	1680	656
12	10	5040	944
14	14	24 024	7640
15	16	43 680	10 912
16	18	73 440	7904

При использовании четырехволновых тактовых комбинаций для  $N$  от 8 до 12 число  $n$  используемых оптических несущих меньше числа ЦК в передаваемой группе. При дальнейшем увеличении  $N$  требуемое количество несущих начинает опережать число ЦК, хотя и значительно меньше, чем при  $m = 2$ . Зато быстро возрастают требования к емкости таблицы кодирования. Но, предположив, что схемы кодера и декодера, работающие со скоростью  $\sim 2,5$  ГГц, будут иметь емкость кодовой таблицы  $\sim 75\,000$  значений, мы получаем, что при  $N = 16$  существует принципиальная возможность передачи информации, по объему эквивалентной каналу 40 Гбит/с ( $16 \times \text{STM-16}$ ), но с применением компонентной базы, рассчитанной на скорость всего 2,5 Гбит/с.

**Кодирование посредством комбинации СВЧ-поднесущих, модулирующих излучение оптических несущих в составе линейного WDM-сигнала**

Если для передачи трафика групп ЦК в WDM-системе выделен только фиксированный набор оптических несущих,  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ , а остальные заняты другими пользователями, то вариант с использованием для кодирования СВЧ-поднесущих [11] позволяет получить улучшение характеристик, аналогичное предыдущему варианту. Формирование кодовых комбинаций осуществляется способом модуляции оптических несущих тактовыми комбинациями СВЧ-поднесущих,

генерируемых синтезатором, входящим в состав кодера. Состав оборудования при этом, естественно, будет включать другие функциональные элементы, изготовление которых может быть обеспечено на базе применения серийно выпускаемых оптоэлектронных модулей и электронных устройств, причем последние могут быть разработаны на базе достаточно хорошо разработанной технологии микросхем СВЧ-диапазона, то есть разработка новых интегрально-оптических узлов (типа входящих в состав КОД, рис. 3) в этом случае не потребуется.

Рассмотрим принцип работы системы для этого варианта. Блок-схема передающего и приемного оборудования изображена на рис. 4.

Устройство входного интерфейса аналогично предыдущему варианту. С выхода ИФ(вх) группа  $N$  ЦК и тактовая частота  $F_T$  подаются на кодер КОД, который в данном случае работает по другому алгоритму — а именно исходя из того, что число возможных тактовых наборов СВЧ-поднесущих, то есть комбинаций (размещений) из  $n$  СВЧ-поднесущих по  $m$  спектрально-разнесенным оптическим каналам, входящим в состав линейного WDM-сигнала, в этом случае составляет, учитывая возможность модуляции всех оптических несущих одинаковыми поднесущими,  $A_n^{m+n} = (n!)/(n-m)! + n$ , так что число возможных тактовых комбинаций должно соответствовать условию:

$$C_T = A_n^{m+n} \geq 2^N. \quad (2)$$

Тактовая частота  $F_T$  ЦК подается на вход синтезатора СВЧ-поднесущих, который формирует  $n$  гармоник  $F_T$  кратность и число которых заданы для системы техническими параметрами (число  $N$  передаваемых ЦК, число  $m$  мультиплексируемых WDM каналов) и рабочими частотами оптоэлектронных модулей, применяемых в оборудовании. Выходные частоты синтезатора подаются на СВЧ-входы кодера КОД, а на видеовходы, как уже говорилось, подводятся параллельно  $N$  входных ЦК и  $F_T$ . Кодер может быть выполнен в виде совокупности высокоскоростной электронной логики и диодных СВЧ-ключей, последовательно отображающей, в соответствии с таблицей кодирования, тактовые комбинации  $N$  входных символов в однозначно соответствующие им наборы по  $m$  СВЧ-поднесущим. Эти тактовые наборы подводятся одновременно к модуляторам  $m$  канальных транспондеров. В конце каждого тактового интервала сигналом тактовой синхронизации производится сброс установки диодных ключей, а затем отображается новая комбинация. Выходные СВЧ модулированные сигналы канальных транспондеров, нормированные по длинам волн к стандартной сетке (G.694), суммируются в оптическом WDM-мультиплексоре, образуя линейный сигнал, выводимый в линию.

На входе приемного терминала (рис. 4б) линейный сигнал сначала демультиплексируется по длинам волн в соответствии с обычным правилом для WDM-систем. Каждый из  $m$  канальных сигналов на выходе DMUX подклю-

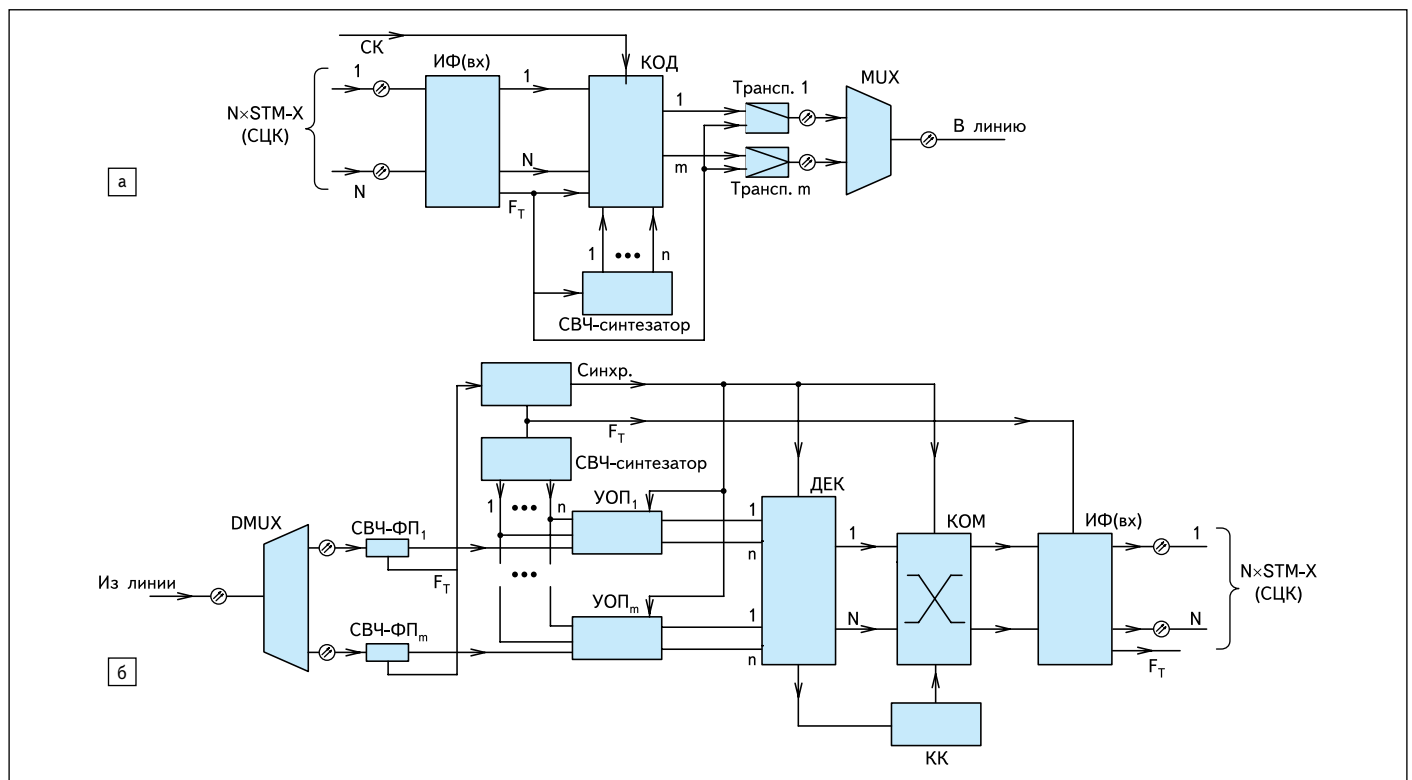


Рис. 4. Обобщенные структурные схемы оборудования ВОЛС-WDM для передачи групп ЦК методом потактового кодирования комбинации СВЧ-поднесущих в составе линейного WDM-сигнала: а) передающего терминала; б) приемного терминала

чается на вход «своего» СВЧ-фотоприемника, в каждом из которых производится детектирование и предварительное усиление фототока во всем диапазоне поднесущих. Выходные электронные сигналы СВЧ-ФП<sub>i</sub> подаются на входы устройств определения принятой поднесущей (УОП<sub>i</sub>) и на устройство тактовой синхронизации (Синхр), которое восстанавливает тактовую частоту  $F_T$  по ее гармоникам, содержащимся в фототоках канальных СВЧ-ФП, и формирует сигналы, необходимые для тактовой синхронизации всех функциональных устройств приемного терминала. Восстановленная тактовая частота  $F_T$  подается на вход СВЧ-синтезатора, работающего аналогично синтезатору в передающем терминале, с той лишь разницей, что набор синтезированных СВЧ-поднесущих с выхода синтезатора поступает не на кодер, а на СВЧ-входы всех УОП<sub>i</sub>.

Принцип работы УОП очень прост: сигнал с выхода канального СВЧ-ФП<sub>i</sub> после усиления на входе УОП<sub>i</sub> делится на  $n$  частей, каждая из них подводится к смесителю, на который поступает одна из  $n$  частот, вырабатываемых СВЧ-синтезатором. На выходе смесителей установлены ФНЧ, видеосигнал на выходах которых образуется лишь при одновременном подходе к смесителю одинаковых поднесущих. Сброс предыдущих значений на границах тактовых интервалов производится по сигналу от «Синхр».

Комбинация  $m$  идентифицированных таким путем поднесущих подводится к входным портам декодера ДЕК, в котором выполняется «обратное отображение», то есть преобразование этой комбинации в тактовое распределение  $N$  символов исходной группы СЦК.

Вариант с кодированием посредством комбинаций СВЧ-поднесущих удобно использовать в ситуациях, когда число  $m$  WDM несущих в линейном сигнале системы должно быть небольшим и постоянным, а тактовые скорости сигналов относительно низки (STM-1, STM-4). Пусть, например, требуется увеличить число передаваемых СЦК со скоростями STM-1, если в линейном сигнале ВОСП-WDM должно быть не более четырех WDM несущих ( $m = 4$ ). Тогда, используя серийные оптоэлектронные модули с полосой рабочих частот до  $\sim 3,5$ –4 ГГц и СВЧ-синтезатор, формирующий 13 поднесущих (от десятой гармоники тактовой частоты  $F_T^{(10)} = 1550$  МГц до  $F_T^{(23)} = 3565$  МГц), можно получить  $C_T = A_n^m + n = A_{13}^4 + 13 = 17173$ , то есть возможно передать до  $N = 14$  СЦК, так как  $C_T > 2^{14} = 16384$ , вместо  $N = 4$  при обычной WDM-передаче. И при этом остается еще  $K = 789$  резервных комбинаций для передачи сервисной информации (коммутация или телемеханика).

В обоих вариантах систем с потактовым кодированием предусмотрена возможность коммутации сигналов, входящих в группу СЦК, одновременно с выполнением потактового кодирования, если на коммута-

ционный вход кодера КОД поступит (например, от NMS-системы, управляющей трафиком ВОСП-WDM) сигнал коммутации СК. Очевидно, если при работе системы необходимо предусмотреть использование  $K$  дополнительных (коммутационных или сервисных) сигналов, то число возможных тактовых комбинаций должно соответствовать условию  $C_T \geq 2^N + K$ . За счет этой избыточности кодер формирует комбинации, включающие дополнительную, «сервисную» информацию. Дешифратор декодера ДЕК идентифицирует сигналы коммутации и передает их в контроллер коммутатора КК, где формируются исполнительные команды непосредственно для коммутатора канальных сигналов в приемном терминале.

### Заключение

Приведем несколько общих замечаний.

Важным моментом для предлагаемого обсуждения является вопрос целесообразности и реализуемости наших предложений. Естественно, их применение ограничивается частным случаем трафика, образованного группами синхронных цифровых каналов, так что необходимы дополнительные данные, характеризующие предположительную востребованность таких систем в перспективе.

Второй момент, зависящий от возможностей отечественной научно-технологической базы, состоит в оценке возможности реализации необходимых функциональных узлов, в первую очередь, гибридных интегральных опико-электронных схем, кодера и декодера с коммерчески целесообразными затратами на разработку и промышленный выпуск. Но, судя по опубликованным материалам [1–3, 5, 6], принципиальные проблемы в этом направлении уже решены. Что же касается функциональных узлов для варианта с СВЧ-поднесущими, то вся описанная электроника, включая СВЧ-синтезатор, кодер-коммутатор, УОП, может быть сконструирована и изготовлена стандартными методами гибридно-пленочной технологии (или даже в виде комплекта специализированных БИС). Эти методы хорошо освоены отечественными предприятиями, а значит, можно ожидать относительную дешевизну и стабильность работы оборудования ВОСП-WDM.

Возникает, с другой стороны, вопрос: ну, а все же, какие потенциальные преимущества можно ожидать от ВОСП-WDM такого типа? Представляется, что к таким преимуществам можно отнести:

1. Уменьшение (в несколько раз) числа одновременно включенных WDM-каналов и, как следствие, сокращение объема оптоэлектронного оборудования, а также, соответственно, большая мощность оптических несущих в тактовых комбинациях. Кроме того, должны существенно снижаться факторы нелинейных искажений (осо-

бенно обусловленных четырехфотонным смещением), которые быстро нарастают с увеличением числа каналов при спектральном мультиплексировании [10].

2. Не требуется организация отдельного служебного канала (ТМ + коммутация) в линейном сигнале. СК передается в составе кодовой комбинации для группы СЦК.
3. Повышаются возможности защиты передаваемой информации от несанкционированного доступа: для приема требуется не только специфическое оборудование, но и знание таблицы кодирования, оперативная смена которой при необходимости может быть произведена в рабочем режиме. ■

### Литература

1. Shamray A. V., Kozlov A. S., Ilichev I. V., et al. A novel modulation format based on the change of an optical spectrum shape // Proceedings of SPIE. Vol. 6896, 68960V. 2008.
2. Korkishko Y. N., Fedorov V. A., Feoktistova O. Y. LiNbO<sub>3</sub> Optical Waveguide Fabrication by High-Temperature Proton Exchange // J. Lightwave Technology. 2000. V. 18, № 4.
3. Патент РФ № 2248022. 10 марта 2005. М.П. Петров, А.В. Шамрай, И.В. Ильичев, А.С. Козлов. Оптический элемент, способ управления его спектральной характеристикой, система оптических элементов и способ управления этой системой.
4. 4×OC48/STM-16 DWDM MuxPonder — Lambda-Driver Module (TM-OC48D) — [www.mrv.com](http://www.mrv.com)
5. Желтиков А. М. Генерация суперконтинуума в фотонно-кристаллических световодах // Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М. В. Ломоносова. Учебно-методическое пособие по курсу лекций.
6. Ludvigsen H. Novel Supercontinuum Sources // Proceedings of 2005 7<sup>th</sup> Conference ICTON 2005. № 1.
7. A. Naumov N., Fedotov A. B. et al. Supercontinuum Generation in Photonic-Molecule Modes of Microstructure Cobweb Fibers and Photonic-Crystal Fibers with Femtosecond Pulses of Tunable 1.1–1.5- $\mu$ m Radiation // Laser Physics. 2002. Vol. 12. № 8.
8. Желтиков А. М. Развитие технологии фотонно-кристаллических световодов в России // Обзоры. Российские нанотехнологии. 2007. Том 2. № 1–2.
9. Компания ТООС (Технология. Оборудование. Стеклоплатные Структуры). Фотонно-кристаллические волокна — [www.tegs.ru/ru/company.shtml](http://www.tegs.ru/ru/company.shtml)
10. JDSU Arrayed Waveguide Grating, 100 GHz Narrowband (Gaussian) — [www.jdsu.com](http://www.jdsu.com)
11. Казанский Н. А., Ереминский Д. Е. Оценка качества передачи информации в оптических сетях связи с плотным волновым мультиплексированием DWDM // Труды РНТОРЭС им. А. С. Попова. Т. 1. LIX Научная сессия, посвященная Дню радио. 2004.
12. Патент РФ № 2124812. 10 января 1999 г. В. Н. Удовиченко. Способ передачи сигналов синхронных цифровых волоконно-оптических систем методом спектрально-кодового мультиплексирования и устройство для его осуществления.