

© 2012 г. Г.Г. СТЕЦЮРА, д-р техн. наук
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ОТКАЗОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ ОБМЕНА ДАННЫМИ

Предложен способ, ускоряющий обнаружение, нейтрализацию и устранение множественных отказов в средствах обмена данными устройств распределенных управляющих систем, объединенных двойными оптическими кольцевыми каналами связи со встречным направлением передачи сигналов и двумя линиями в каждом канале.

METHOD OF FAILURES ELIMINATION IN OPTICAL DATA EXCHANGE MEANS / G.G. Stetsjura (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Profsoyuznaya 65, Moscow 117342, Russia, E-mail: stetsura@ipu.ru).
Abstract. Acceleration of detection, neutralization and elimination of plural failures of the data exchange means of distributed systems, we propose. The double optical ring communication channels with an opposite direction of signaling are used.

1. Введение

В распределенных управляющих системах одним из важнейших звеньев являются средства обмена данными между устройствами обработки данных с одной стороны и измерительными и исполнительными устройствами с другой стороны. Часто эти средства имеют структуру, в которой имеется центральное устройство (лидер, мастер) управляющее работой ведомых устройств (ВУ) – получающее от ВУ данные или посылающее им команды по общей шине.

Примеры таких структур дают стандарты IEEE–1533, –1773. Это достаточно простые решения, не требующие больших аппаратных затрат, но они имеют низкую отказоустойчивость: неуправляемая передача сигналов одним из устройств блокирует работу всех устройств.

Существуют также структуры, в которых устройства системы связываются при помощи коммутаторов, которые при более высокой сложности предоставляют устройствам для каждого межсоединения отдельный канал. При этом достигается и более высокая пропускная способность. Примером такого решения служит SpaceWire (ECSS-E-ST-50-12C).

В докладе предлагается структура близкая по сложности к первой приведенной структуры, но обладающая более высокой отказоустойчивостью. Она сохраняет работоспособность при неуправляемой передаче сигналов одним из устройств или группой устройств, определенной ниже. Кроме этого предлагаемый способ позволяет с высокой скоростью идентифицировать отказавшие устройства.

2. Структура связи и взаимодействие устройств

Обмен сообщениями инициирует управляющее устройство – лидер (Л), посылая сообщения-команды ведомым устройствам (ВУ). Команда ретранслируется ведомыми устройствами. Команда лидера и сообщение, созданное ВУ, возвращаются к лидеру по кольцевому оптическому каналу. Каждый кольцевой канал содержит две линии a и b . Лидер и ВУ не имеют источников оптических сигналов: используется внешний источник непрерывных сигналов.

Каждое ВУ кроме средств, необходимых для выполнения его основных функций, содержит для каждого канала по два блока доступа к каналу. Это блок приема в ВУ сигналов из канала, ретрансляции приходящих из канала сигналов, передачи внешних сигналов в канал, выполняемых без задержки преобразований сигналов в канале, и блок устранения ошибок в передаче данных. Оба блока могут быть выполнены как отдельное устройство, встроенное в канал и имеющее разъем для подключения ВУ.

Если сигнал передается по линии a , то это состояние обозначим как $a+$, соответственно для линии b как $b+$. Отсутствие сигналов обозначим как $a-$ и $b-$. Четыре комбинации распределения сигналов обозначим: $a+$ и $b-$ как 1, $a-$ и $b+$ как 0, $a+$ и $b+$ как C , $a-$ и $b-$ как Z .

Внешний источник оптических сигналов посылает лидеру непрерывные сигналы в обе линии ($C = a+ + b+$). Лидер, посылая сообщение, превращает C в последовательность битов 1 и 0. Переводя C в Z , лидер запрещает всем ВУ передавать собственные сигналы в канал. ВУ передают свои сообщения, превращая C в 1 и 0.

3. Преобразование сигналов и распределенные вычисления

Указанное в разделе 2 преобразование сигналов проводится с помощью интерферометров Маха-Цандера, действующих как оптический переключатель. Такие переключатели в ИВМ применены для коммутации в суперкомпьютерах [1 – 4]. Рассмотрим преобразователь, показанный на рис. 1. Здесь $M1 - M4$ – оптические переключатели. Буквами a и b обозначены входные и выходные линии канала. При подаче на M_i управляющих сигналов со значением 1 или 0 сигнал с любого входа M_i будет поступать на его выходы, в соответствии с таблицей, где в ячейках колонок 2 – 4 даны значения управляющих сигналов. В колонке "вход" указаны две входные линии. В колонке "выход" указан путь перемещения входного сигнала. Например, во второй строке сигнал с линии a (b) переходит на линию b (a).

При подаче наборов сигналов M_i , указанных в первых четырех строках таблицы, выполняются все переключения входов/выходов a и b . Следующие четыре строки таблицы обеспечивают такие же действия для выходов a' и b' . Последние строки переводят сигнал b в b' и a в a' . Это позволяет устройству из рис. 1 выполнять переключение линий и преобразование данных. Линии a' и b' могут быть использованы для изменения пути перемещения сигналов в системе и для вывода сигналов из системы в любом ее месте.

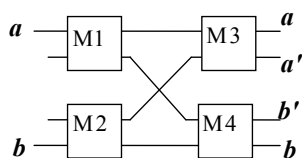


Рис. 1. преобразователь

ВУ, которые могут изменять значение приходящего из канала сообщения, действуют в соответствии с первыми четырьмя строками таблицы. Источник собственного сообщения действует в соответствии с третьей, четвертой или двумя последними строками таблицы, формируя данные из приходящих сигналов С, одновременно поступающих в обе линии канала.

Важное для повышения отказоустойчивости свойство преобразователя состоит в том, что при отсутствии управляющих сигналов ключи преобразователя соединяют входы и выходы линий канала, т.е. превращаются в участок канала и не могут исказить проходящие по каналу сигналы.

Таблица. Работа преобразователя

| № | M1 | M2 | M3 | M4 | Вход | Выход |
|----|----|----|-----|-----|-------|---------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | a/b | a/b |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | a/b | b/a |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 1/0 | a/b | a/a |
| 4 | 1 | 0 | 1/0 | 0 | a/b | b/b |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | a/b | a'/b' |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | a/b | b'/a' |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1/0 | a/b | a'/a' |
| 8 | 1 | 0 | 1/0 | 1 | a/b | b'/b' |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | a/b | a/b' |
| 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | a/b | a'/b |

В [5, 6] показано, что с помощью приведенного преобразования сигналов можно также выполнять логические операции, арифметические сложение, вычитание и умножение *без задержки* на такое вычисление.

Приведем два требуемых ниже примера распределенных вычислений – счет и нахождение \max/\min .

Операция Счет: каждое ВУ должно к числу в поле команды прибавить 1. Числа обрабатываются, начиная с младшего разряда. Над каждым разрядом следующим способом проводится операция "исключающее ИЛИ": если разряд в ВУ равен 0, то разряд в поле команды пропускается далее в канал без изменений. Если разряд в ВУ равен 1, то значение разряда в поле команды инвертируется, и ВУ для обработки следующего разряда в поле команды должно скорректировать свой разряд с учетом образовавшегося переноса единицы.

Нахождение \max . Требуется сравнить число, находящееся в поле команды лидера с числом, хранящемся в конкретном ВУ, и оставить в поле команды наибольшее значение. Разряды обрабатываются, начиная со старшего разряда. Проводится поразрядное сравнение чисел.

Если текущий разряд числа в ВУ равен 1, то 1 должна быть занесена в тот же разряд числа в поле команды. Если при этом поступивший из поля команды разряд равен 0, то все остальные разряды числа ВУ должны заменить разряды числа в поле команды, иначе ВУ переходит к таким же действиям со следующим разрядом.

Если текущий разряд числа в ВУ равен 0, то значение разряда в поле команды не меняется. Если при этом разряд в поле команды равен 1, то данное ВУ содержит число, меньшее числа в поле команды, и ВУ прекращает свое участие в операции. Если разряд в поле команды равен 1, то ВУ участвует в обработке следующего разряда числа в поле ко-

манды.

После того, как сообщение – команда обойдет все ВУ, в ее поле будет находиться максимальное из чисел, хранящихся во всех ВУ. Аналогично выполняется операция \min с заменой значений проверяемых чисел с 1 на 0.

Как видно, операции счет и нахождение \max/\min выполняются без задержки сообщения.

На рис. 2 показано устройство, выполняющее действия, приведенные в таблице, а также блокирующее несанкционированную лидером передачу сигналов из ВУ в канал.

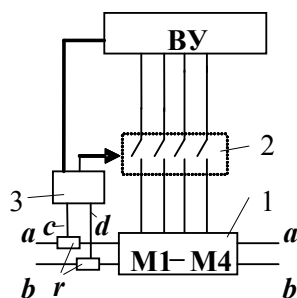


Рис. 2 Общая схема устройства блокировки ошибок

Здесь узел 1 содержит преобразователь, показанный на рис. 1. ВУ передает свое сообщение, подавая управляющие электрические сигналы на оптические ключи узла 1 через электронные ключи 2, управляемые узлом 3. Узел 3 получает часть энергии оптических сигналов из линий кольцевого канала через ответвители r , формирующие электрические сигналы на линиях c и d , и разрешает проход сигналов из ВУ только при наличии сигналов на обеих входящих в узел линиях кольцевого канала. Узел 3 направляет принятые из канала сигналы в ВУ.

В результате при исправных узлах 2 и 3 запрещается передача сигналов в канал от ВУ, расположенного после ВУ, выбранного лидером для передачи. ВУ, расположенные ближе к лидеру, могут исказить указанную разрешенную передачу, но они не могут помешать передаче команд лидера.

При наличии двух кольцевых каналов получаем следующий результат. ВУ при исправных узлах 2 и 3 не могут исказить разрешенное лидером сообщение, если указанные ВУ в каждом канале расположены после источника разрешенного сообщения, любые источники не могут исказить команду лидера.

Требование исправности узлов 2 и 3 можно ослабить следующим образом. Запрещенные сигналы ВУ могут проникнуть в канал только при наличии двойной локальной неисправности: ВУ генерирует запрещенную передачу сигналов, узлы 2 и 3 неисправны и пропускают эти сигналы в канал. Если двойной неисправности нет, то канал работоспособен и при отказах в узлах 2 и 3.

Кроме этого узел 3 разрешает проход сигналов из ВУ при наличии сигнала только на одной из линий канала, если этому предшествует приход по линиям канала кода разрешения указанного действия. Для отмены такой возможности в узел 3 должен поступить из канала код запрета. Об изменении правил передачи сигналов узел 3 информирует ВУ.

Такие действия применяются, если требуется выполнять распределенные вычисления. Команда лидера, требующая проведения распределенных вычислений, должна начинать поле, в которое будет помещен результат распределенного вычисления с указанного кода разрешения, который переведет узел 3 в режим, разрешающий ВУ преобразование двоичных сигналов. Указанное поле должно завершаться кодом запрета, который возвра-

тит узел 3 в режим блокировки несанкционированной передачи сигналов от ВУ. Пара таких кодов действует как открывающая и закрывающая скобки, изменяющие режим работы узла 3 внутри этого ограничения.

В следующем разделе рассматриваются быстрые способы обнаружения неисправных устройств.

4. Обнаружение устройств, не реагирующих на команды лидера

Покажем, как находить ВУ, которые не посылают сигналы в канал в ответ на команды лидера. Пусть лидеру присвоен порядковый номер 0 и номера ВУ увеличиваются на 1 по мере удаления от лидера. В команде, посылаемой лидером, создается последовательность полей $abcd$. В поля acd лидер заносит единицу, в поле b заносит 0.

Каждое ВУ читает число, находящееся в поле a , и одновременно увеличивает его в ретранслируемом сообщении на единицу. Если поступившее в ВУ поле a содержит число, совпадающее с порядковым номером ВУ, то в поля cd вносится порядковый номер следующего ВУ.

Если совпадения с порядковым номером ВУ нет, то ВУ в поле b вносит 1 и одновременно проверяет, содержало ли это поле 1 до записи. Если единицы не было, то в поле c вносится порядковый номер ВУ, принимающего данное сообщение. Это фиксирует порядковый номер первого исправного ВУ, расположенного непосредственно за ВУ, не реагирующим на команду. Если поле b содержало 1, то c не изменяется.

При возвращении команды по кольцу к лидеру число в поле a определяет количество работоспособных ВУ. При наличии 1 в поле b поле d содержит номер ближайшего к лидеру неработоспособного ВУ, а поле c содержит номер работоспособного ВУ, расположенного первым за неработоспособным ВУ или за непрерывной последовательностью неработоспособных ВУ. Если поступившее к лидеру число в поле a не совпадает с количеством ВУ, а поле b содержит 0, то неисправно последнее по порядку ВУ.

Изложенное решение позволяет определить места расположения множественных отказов ВУ, образующих ближайшую к лидеру непрерывную цепочку. Вводя новую нумерацию ВУ, лидер поочередно может определить и другие такие цепочки. Но лидер может действовать иначе: лидер посылает широкоэвещательную команду проверки ВУ, в которой размещается последовательность разрядов 0 в количестве, равном количеству ВУ. Каждое исправное ВУ в соответствующем ему разряде заменяет 0 на 1, не задерживая сообщение, что позволяет посылкой одной команды обнаружить все неисправные ВУ.

Применение операций распределенных вычислений позволяет в ряде случаев значительно быстрее, чем дают общепринятые решения, определять не только состояние рассматриваемых средств обмена данными, но и состояние распределенного объекта, обслуживаемого системой связи. Так, используя операции *max/min*, за время перемещения команды по кольцевому каналу лидер обнаружит объекты системы, для которых значения измеряемых параметров достигают *max/min* или выходят за заданные пределы. Операция счет позволяет определить количество объектов с указанными отклонениями, найти ближайший к лидеру или наиболее удаленный от него такой объект. В пределах единственной команды можно разместить несколько полей с данными, которые будут обрабатываться без задержки сложным набором вычислительных операций.

При отключении объектов операция счет позволяет по команде лидера быстро пере-
нумеровать работоспособные объекты.

5. Выбор лидера

Выше предполагалось, что лидер единственный, но отказоустойчивость системы повышается, если разрешить в динамике выбор лидера из набора возможных претендентов на лидерство.

Пусть внешний источник передает постоянный оптический сигнал по дополнительной линии канала. Каждый потенциальный лидер имеет оптический ключ, который при подаче управляющего электрического сигнала направляет сигнал внешнего источника этому устройству.

В этом случае для переключения лидера действующий лидер посылает команду новому лидеру, прекращает получение сигнала от внешнего источника и замыкает линии кольцевых каналов. Новый лидер разрывает линии кольцевых каналов и отбирает себе сигнал внешнего источника, что завершает замену лидера. Сигнал внешнего источника лидер превращает в сигнал С.

При начальном запуске системы или при отказе действующего лидера требуется осуществить начальный выбор лидера. Для этого несколько изменим изложенные действия. Потенциальные лидеры обнаруживают отсутствие сигналов в линиях каналов в течение заданного интервала времени, что служит сигналом для начала выбора лидера. Все претенденты на лидерство пытаются забрать себе сигнал внешнего источника. Очевидно, этот сигнал получит только один претендент, ближайший к внешнему источнику сигналов. Он станет лидером, разорвет кольцо и направит внешний сигнал в линии в виде сигнала С. Все проигравшие лидерство устройства обнаружат появление лидера по отсутствию сигнала внешнего источника и появлению в канале сигнала С и перейдут в состояние, предшествующее борьбе за лидерство.

6. Заключение

Предложенный в докладе способ обнаружения и устранения отказов в обмене данными с применением оптических ключей обладает следующими преимуществами.

- При наличии двух оптических кольцевых каналов со встречным направлением передачи сигналов и двумя линиями в каждом канале можно указать условия, при которых при неуправляемой генерации сигналов неисправными источниками не нарушается работа других устройств.
- Выполняемые без задержки вычисления над полями команды лидера способствуют ускорению нахождения отказавших устройств.
- При отсутствии электронных управляющих сигналов оптический ключ, управляющий прохождением сигналов в канале, действует как отрезок оптоволоконной линии, проводящей сигналы. Ключ не требует поступления энергии для того, чтобы поддерживать такое состояние.
- Источники передаваемых по линиям сигналов находятся вне системы, что уменьшает затраты энергии внутри системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Campenhout J., Green W.M.J., Vlasov Y.A.* Design of a digital, ultra-broadband electro-optic switch for reconfigurable optical networks-on-chip// OPTICS EXPRESS. Vol. 17. No.26. 2009. p. 23793 – 23808.
2. *Van Campenhout J., Green W.M.J., Assefa S., Vlasov Y.A.* Low-power, 2×2 silicon electro-optic switch with 110-nm bandwidth for broadband reconfigurable optical networks// //

OPTICS EXPRESS. Vol. 17. No. 26. 2009. p. 24020 – 24029/

3. *Yang M., Green W.M.J., Assefa S. et. al.* Non-Blocking 4x4 Electro-Optic Silicon Switch for On-Chip Photonic Networks// OPTICS EXPRESS. Vol. 19. No.1. 2011. p. 47 – 54.6.

4. *Vlasov Y.A.* CMOS Integrated Silicon Nanophotonics: Enabling Technology for Exascale Computational Systems// Semicon. Tokyo. 2010.

http://www.research.ibm.com/photonics/publications/SEMICON_Tokyo_12_1_2010.pdf

5. *Подлазов В.С., Стецюра Г.Г.* О потребности в новых логических элементах//Журнал радиоэлектроники РАН. 2009, № 6. (электронный журнал <http://jre.cplire.ru/>)

6. *Стецюра Г.Г.* Совмещение вычислений и передачи данных в системах с коммутаторами // АиТ. 2008. № 5. С. 170 – 179.