

Arquitectura de Computadores



Los Del DGIIM, losdelcgiim.github.io

Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas
Universidad de Granada



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

Eres libre de compartir y redistribuir el contenido de esta obra en cualquier medio o formato, siempre y cuando des el crédito adecuado a los autores originales y no persigas fines comerciales.

Arquitectura de Computadores

Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

José Juan Urrutia Milán
Arturo Olivares Martos

Granada, 2023-2024

Índice general

1. Arquitecturas TLP	5
1.1. Tipos de Arquitecturas	5
1.1.1. Objetivos	5
1.1.2. Clasificaciones de arquitecturas TLP	5
1.1.3. Repaso de arquitecturas ILP	6
1.1.4. Clasificaciones de cores multithread	7
1.1.5. Comparativa de cores multithread	9
1.2. Coherencia del sistema de memoria	10
1.2.1. Objetivos	10
1.2.2. Definición del problema	10
1.2.3. Protocolos de coherencia entre cachés	12
1.2.4. Protocolos de mantenimiento de coherencia	14
1.2.5. Protocolo MSI (<i>Modified-Shared-Invalid</i>) de espionaje	15
1.2.6. Protocolo MESI (<i>Modified-Exclusive-Shared-Invalid</i>) de espio- naje	21
1.3. Consistencia del sistema de memoria	25
1.3.1. Objetivos	25
1.4. Sincronización	26
1.4.1. Objetivos	26
2. Relaciones de Problemas	27

1. Arquitecturas TLP

En este capítulo, nos centraremos en arquitecturas que permiten ejecutar de forma paralela o concurrente múltiples flujos de instrucciones (o *threads*) que comparten memoria. Se tratan de arquitecturas con paralelismo a nivel de *thread* (*Thread-Level Parallelism*) con una única instancia del Sistema Operativo. Por tanto, cada vez que mencionemos arquitecturas TLP, nos estamos refiriendo a arquitecturas TLP con una única instancia del Sistema Operativo. En este contexto, el SO es el encargado de gestionar los flujos de instrucciones.

Los paradigmas de programación paralela por variables compartidas son los más fáciles de implementar en este tipo de arquitecturas, mientras que las orientadas a paso de mensajes están más relacionadas con arquitecturas TLP con múltiples instancias del SO.

La compartición de memoria que se da trae conceptos como la coherencia del sistema de memoria, consistencia del sistema de memoria o la sincronización entre flujos; conceptos que estudiaremos a lo largo de este capítulo.

1.1. Tipos de Arquitecturas

1.1.1. Objetivos

Esta sección está orientada a:

- Distinguir entre cores multithread, multicores y multiprocesadores.
- Comparar entre cores multithread de grano fino, grueso y cores con multithread simultáneo.

1.1.2. Clasificaciones de arquitecturas TLP

Las arquitecturas TLP con una instancia del SO pueden clasificarse en:

Multiprocesadores. Son capaces de ejecutar en paralelo varios flujos de instrucciones (hilos) en un computador con varios núcleos o procesadores de forma que cada flujo se ejecuta en un núcleo o procesador distinto.

Podemos encontrarnos multiprocesadores en un chip (como los multinúcleos), en una placa o en uno o varios armarios.

Multinúcleos (*multicores*). Pueden ejecutar en paralelo varios flujos de instrucciones en un chip de procesamiento con múltiples núcleos de forma que cada flujo se ejecuta en un núcleo distinto. Un chip multinúcleo no es más que un multiprocesador en un chip.

La denominación de *multicores* proviene de un nombre comercial que dio Intel a sus multiprocesadores en un chip. Además, denominó *procesador* a los chips o encapsulados de procesamiento y *núcleos* (o *cores*) a los procesadores.

Núcleos (o cores) *multithread*. Se trata de un núcleo de procesamiento (un procesador) en el que se ha modificado su arquitectura ILP (*Instruction Level Parallelism*) para poder ejecutar flujos de instrucciones de forma concurrente o en paralelo.

1.1.3. Repaso de arquitecturas ILP

Recordamos lo que eran las arquitecturas ILP (*Instruction Level Parallelism*): son la capacidad por parte de un procesador de ejecutar múltiples instrucciones en paralelo para mejorar el rendimiento del sistema. Las arquitecturas se centran en identificar y aprovechar las dependencias de datos entre las instrucciones para ejecutarlas de forma eficiente.

Etapas de ejecución

Antes de continuar, recordamos las etapas básicas para la ejecución de una instrucción:

Etapas de captación de instrucciones (*Instruction Fetch*).

Etapas en la que se capta de la caché de instrucciones la siguiente instrucción a ejecutar, incrementando el valor del PC (*Program Counter*).

Etapas de decodificación de instrucciones (*Instruction Decode*).

Etapas en la que se decodifica la instrucción captada para determinar su tipo y operaciones a realizar. Se identifican aquí las dependencias de datos y condiciones de control que pueden afectar la ejecución de la instrucción.

Etapas de ejecución (*Execution*).

Se lleva a cabo la ejecución de la instrucción. Podemos encontrarnos 4 tipos de instrucciones (en relación a ellos se ejecutará una cosa u otra).

- Operaciones de enteros.
- Operaciones de coma flotante.
- Saltos.
- Escrituras o lecturas de memoria.

Aunque esta última no se realizaría en esta etapa, es importante para el desarrollo que vamos a hacer de arquitecturas ILP.

Etapas de acceso a memoria (*Memory*).

Se accede a memoria en caso de que sea necesario (depende de la instrucción).

Etapas de almacenamiento de resultados en registros (*Write-Back*).

Se almacenan en los registros del procesador los resultados de la instrucción, si es necesario.

Formas de arquitecturas ILP

Podemos encontrarnos con dos formas principales de paralelizar estas etapas a la hora de desarrollar una estructura ILP:

Escalar segmentada.

Segmentaremos las etapas de ejecución de forma que dispongamos de 5 módulos que sean capaces de procesar su parte de forma paralela. Incluiremos *buffers* auxiliares entre las distintas etapas.

VLIW y superescalar.

Consideraremos simplemente 4 etapas (fusionaremos las de ejecución y memoria en una), de forma que replicaremos los componentes de la unidad funcional para que esta sea capaz de ejecutar al mismo tiempo diversos tipos de instrucciones. También es necesario el uso de *buffers* auxiliares.

Por ejemplo, podemos replicar los componentes de la unidad funcional de forma que podamos ejecutar en paralelo (al mismo tiempo):

- Operaciones con enteros.
- Operaciones de coma flotante.
- Operaciones de lecturas y escrituras en memoria.
- Saltos.

Podemos además tener no sólo una unidad sino varias de las ya mencionadas (2 unidades para operaciones con enteros, ...).

Además, las 3 etapas restantes estarán segmentadas. Podemos tener también unidades superescalares en las que tengamos replicadas además las etapas de captación, decodificación y *write-back*.

1.1.4. Clasificaciones de cores multithread

Ahora vamos a clasificar los *cores multithread*, que no dejan de ser procesadores con arquitectura ILP que se aprovechan para ejecutar a la vez distintos hilos del sistema operativo de forma concurrente o paralela.

***Temporal Multithreading* (TMT)**

Ejecutan distintos hilos de forma concurrente en el mismo core. De esta forma, emite instrucciones de un único hilo en cada ciclo. Podemos pensar que el core se está multiplexando.

La conmutación entre hilos la decide el hardware.

***Simultaneous MultiThreading* (SMT)**

Ejecuta distintos hilos de forma paralela en el mismo core. Pueden llegar a

emitir en un sólo ciclo instrucciones de varios hilos. Para llevar esto a cabo, necesitamos un core superescalar.

No implementa conmutación entre hilos, al no ser necesaria.

Según qué tan seguido intercambiamos los hilos del core, nos encontramos con:

TMT de grano fino (*Fine-grain multithreading*, FGMT).

La conmutación de hilos en el core se realiza en cada ciclo. Presentan un coste de cambio de contexto bajo, no es necesario perder ningún ciclo para realizar los cambios de contexto.

La planificación del siguiente hilo a ejecutar puede ser *round-robin* u otra técnica de planificación (podemos guiarnos por el hilo menos recientemente ejecutado, por accesos a datos, por saltos no predecibles, por operaciones con gran latencia, ...).

TMT de grano grueso (*Coarse-grain multithreading*, CGMT).

La conmutación entre hilos no se realiza en cada ciclo. Presentan un mayor coste por cambios de contexto: pueden perderse entre ninguno y varios ciclos debido a los cambios de contexto.

La planificación puede depender cualquier técnica, como tras intervalos de tiempos prefijados (*timeslice multithreading*), por eventos de cierta latencia (*switch-on-event multithreading*), ...

Clasificación de cores con CGMT con conmutación por eventos

Podemos conmutar los hilos del core de grano grueso de forma:

Estática.

Realizando la conmutación de forma *explícita*, mediante nuevas instrucciones para conmutación añadidas al repertorio; o de forma *implícita*, al detectar instrucciones e carga, almacenamiento, salto, ...

- Como ventaja, destacamos el bajo coste de los cambios de contexto (de 0 o 1 ciclos).
- Como inconveniente, pueden producirse cambios de contexto innecesarios.

Dinámica

La conmutación se realiza típicamente por fallos de caché o por interrupciones (interrupciones por señales).

- Como ventaja, reduce los cambios de contexto innecesarios de la estática.
- Como inconveniente, la sobrecarga que se añade por los cambios de contexto es mayor.

Hardware	CGMT	FGMT
Registros	Replicado (al menos el PC)	Replicado
Almacenamiento	Multiplexado	Cualquiera de las 4
Hardware de etapas del cauce	Multiplexado	Captación repartida o compartida, el resto multiplexadas
Necesidad de distinguir el hilo de una instruc.	Sí	Sí
Hardware para conmutar	Sí	Sí
Hardware	SMT	CMP
Registros	Replicado	Replicado
Almacenamiento	Todo menos multiplexado	Replicado
Hardware de etapas del cauce	Unidad funcional compartida, el resto repartidas o compartidas	Replicado
Necesidad de distinguir el hilo de una instruc.	Sí	No
Hardware para conmutar	No	No

Tabla 1.1: Comparación de tipos de multithreading.

Característica

En un núcleo multithread, podemos usar las siguientes modificaciones con el objetivo de ejecutar varios hilos en un mismo core:

- Multiplexado: Hacemos que los hilos se turnen en el uso de una unidad.
- Repartición: Repartimos una unidad entre (al menos) dos hilos, de forma que a uno le asociamos su zona y al otro la suya.
- Compartición: Hay (al menos) dos hilos que acceden a la misma unidad de forma simultánea.
- Replicación: Disponemos de varias unidades, de forma que cada hilo puede hacer uso de una.

Notemos que tanto el precio de implementación como la bondad de la técnica se encuentran en orden creciente (siendo más caro y mejor realizar la replicación de unidades).

Una vez desarrollada la clasificación de cores multithread, podemos mostrar la Tabla 1.1 a modo de resumen, que nos ayudará a entender mejor cada tipo de multithreading. “CMP” es un Chip multicore, aquel en el que tenemos replicado todo el cauce (esto es, todas las unidades de la etapa de ejecución).

1.1.5. Comparativa de cores multithread

1.2. Coherencia del sistema de memoria

A la hora de usar multiprocesadores, surge un problema fundamental de manera natural: las incoherencias en memoria. A lo largo de esta sección definiremos este problema, dando ejemplo y protocolos que lo resuelven. Cabe mencionar que todos los multiprocesadores salvo los NUMA implementan la coherencia del sistema de memoria por hardware.

1.2.1. Objetivos

Tras esta sección, debería ser capaz de:

- Comparar los métodos de actualización de memoria principal implementados en caché.
- Comparar las alternativas para propagar una escritura en protocolos de coherencia de caché.
- Explicar qué debe garantizar el sistema de memoria para evitar problemas por incoherencias.
- Describir las partes en las que se puede dividir el análisis o el diseño de protocolos de coherencia.
- Distinguir entre protocolos basados en directorios y protocolos de espionaje (snoopy).
- Explicar el protocolo de mantenimiento de coherencia de espionaje MSI.
- Explicar el protocolo de mantenimiento de coherencia de espionaje MESI.
- Explicar el protocolo de mantenimiento de coherencia MSI basado en directorios con difusión y sin difusión.

1.2.2. Definición del problema

La utilización de memoria caché trae consigo el esquema de jerarquía de memoria y la posibilidad de tener en distintas jerarquías una misma posición de memoria repetida. En sistemas uniprosesor, si tratamos de modificar una posición de memoria, esta se llevará a caché y será modificada en caché, indicando que ha sido modificada. En un cierto momento, la modificación en esta jerarquía de caché será comunicada a jerarquías de memoria mayores, hasta llegar a memoria principal y modificar dicho dato. De esta forma, la próxima vez que se necesite en caché dicha posición, estará actualizada conforme a la última modificación.

Recordamos ahora que cada procesador lleva asociada una memoria caché y, al ser mayor la memoria principal que la caché, necesitamos almacenar en algún sitio qué bloque de memoria principal contiene cada entrada de memoria caché. Esta información se almacena en una tabla asociada a la caché. En dicha tabla hay una entrada por cada dirección de la memoria caché y, en cada entrada, se almacena

0	Dirección de MP	Bits
1	Dirección de MP	Bits
	\vdots	\vdots
$N - 1$	Dirección de MP	Bits

Tabla 1.2: Tabla para una caché de N direcciones de memoria.

qué bloque de memoria principal está cargado y unos bits de información sobre el bloque cargado. Representamos una aproximación a esta tabla en la Figura 1.2. En un sistema uniprosesor, nos basta con un bit sucio (que indique si el bloque ha sido modificado o no, para saber si hay que escribir en jerarquías superiores) y un bit de validez (que indique si el bloques es válido).

En un multiprosesor, cada procesador lleva consigo una memoria caché, de forma que todos los procesadores comparten el espacio de memoria. Puede suceder que dos procesadores distintos trabajen con la misma posición de memoria k (y por tanto, tengan al bloque que contiene a k en sus respectivas cachés). Si uno de los dos procesadores decide modificar k , se modificará la dirección de memoria caché correspondiente, pero el bloque en la caché del otro procesador y en memoria principal quedarán inalterados. Nos acabamos de encontrar con una incoherencia en el sistema de memoria.

Concretando las ideas, una **incoherencia en el sistema de memoria** se produce cuando en el sistema de memoria las copias de una misma dirección no tienen el mismo contenido. Como hemos ya comentado, en sistemas uniprosesores teníamos este problema: podíamos tener un bloque en memoria caché modificado que no estuviese modificado en memoria principal. En este caso hablamos de incoherencias en distintas jerarquías de memoria. Sin embargo, ahora en multiprosesores podemos tener incoherencias en la misma jerarquía de memoria, tal y como mencionábamos en el ejemplo anterior.

Métodos de actualización de memoria principal

Las situaciones de incoherencia se deben abordar no permitiendo que se produzcan nunca o bien evitando que causen problemas (que algún componente lea el valor no actualizado de la memoria) en caso de permitirse. Las cachés implementan dos métodos de actualización de memoria principal:

Escritura directa (*write-through*).

Con escritura directa, no se permiten situaciones de incoherencia entre caché y memoria principal al escribir en caché: cada vez que se escribe en un bloque de la caché, el correspondiente bloque de la memoria principal es modificado.

Por tanto, tenemos una escritura en memoria principal por cada escritura, lo que requiere usar la red de comunicación entre procesador y memoria principal. Este sobreuso de la red empeora más aún en multiprosesores, al tener múltiples procesadores que son susceptibles de modificar datos de forma paralela.

Otro problema que se plantea es desaprovechar los principios de localidad espacial y temporal (al modificar una variable, es posible que se modifique otra próxima a ella, o que la ya modificada se vuelva a modificar próximamente), por lo que sería mejor esperar a que termine la modificación en curso (por ejemplo, si estamos iterando sobre un vector y modificando sus componentes), antes de escribir en memoria los cambios modificados.

Cabe destacar también que sí pueden producirse con escritura directa situaciones de incoherencia entre cachés (dos cachés tienen el mismo bloque y una lo modifica) y entre caché y memoria principal (cuando un componente modifica la dirección de un bloque de memoria principal que se encuentra en alguna caché del multiprocesador). En sistemas uniprocesadores, tenemos la ventaja de no necesitar un bit sucio.

Posescritura (*write-back*).

En posescritura, cuando una dato es modificado por un procesador, sólo se modifica en la caché correspondiente a dicho procesador. La actualización en memoria principal se produce cuando un bloque modificado (un bloque en el que se ha alterado una dirección de memoria mientras estaba en la caché) es retirado de la caché (por ejemplo, para hacer sitio a otro bloque más necesario). De esta forma, minimizamos el número de accesos a memoria y, por tanto, de uso de la red de conexión entre el procesador y la memoria; aprovechando los principios de localidad espacial y temporal.

De esta forma, se permiten situaciones de incoherencia entre caché y memoria principal (incluso en sistemas uniprocesador). También puede producirse cualquier tipo de incoherencia en este sistema, empeorando la situación que teníamos con escritura directa.

Es necesario además mantener la información sobre qué bloques han sido modificados en caché y cuales no. Esta labor la realiza un bit en la tabla de la caché, llamdo “bit sucio”.

Lo usual en cachés es que usen posescritura, debido a sus ventajas frente a escritura directa. A continuación, estaremos hablando siempre de sistemas multiprocesadores, ya que en sistemas uniprocesadores las situaciones de incoherencia ya están resueltas (tanto con escritura directa no permitiendo incoherencias tanto con posescritura, permitiendo incoherencias pero controlando que no provoquen fallos).

1.2.3. Protocolos de coherencia entre cachés

Como ya habrás podido deducir, nuestra tarea ahora es buscar cómo resolver las incoherencias ya mencionadas, y manejar las incoherencias que se permiten para que no provoquen fallos en el sistema. Para evitar situaciones de incoherencias entre cachés, se deben cumplir las siguientes dos condiciones:

1. **Propagación de escrituras.** Se debe garantizar que todo lo que se escribe en la copia de un bloque en caché se propague a las copias del bloque en otras cachés.

2. **Serialización de escrituras.** Se debe garantizar que las escrituras en una dirección se ven en el mismo orden por todos los procesadores: el sistema de memoria debe parecer que realiza en serie las operaciones de escritura en la misma dirección. Debe dar la impresión de que estas operaciones sean atómicas.

Esto es de vital importancia en arquitecturas donde no todos los procesadores tienen el mismo (o similar) tiempo acceso a sus cachés, como los NUMA, debemos garantizar que el primer procesador que se dispuso a escribir en memoria sea el primero que lo haga.

Los **protocolos de coherencias de caché** buscan resolver el problema de las incoherencias entre cachés, de forma que cada escritura en caché sea visible para el resto de procesadores, propagando de forma fiable el valor escrito en una dirección. Los protocolos de coherencia usan dos alternativas principales para propagar escrituras a otras cachés:

Escritura con actualización (*write-update*).

Siempre que se modifique una dirección en la copia de un bloque en una caché, se modifica dicha dirección en las copias del mismo bloque de memoria que tengan el resto de procesadores en sus cachés (en caso de tenerlo). Si se cumplen los principios de localidad espacial y temporal, esto provoca una alta sobrecarga en la red de comunicación, al tener que avisar al resto de procesadores la modificación de una variable.

Escritura con invalidación (*write-invalidate*).

Antes de que un procesador modifique un bloque en su memoria caché, invalida el resto de copias del mismo bloque en las cachés de otros procesadores. Posteriormente, es libre de modificar su bloque tantas veces como desee, obteniendo un *acceso exclusivo* al bloque.

Cuando otro procesador quiera acceder a dicho bloque desde su caché, en caso de tenerlo, verá que estará invalidado y deberá solicitarlo a la memoria (en caso de que el bloque se encuentre actualizado en memoria) o al procesador que tenía el acceso exclusivo al bloque. Es necesario por tanto disponer de un bit en la tabla de la caché que indique si un bloque se encuentra invalidado o no.

Notemos que invalidar es más rápido que actualizar, ya que sólo necesitamos recibir la información del bloque invalidado y cambiar un bit, en lugar de reescribir el bloque completo.

Esta práctica sólo permite compartir bloques de memoria mientras sólo se lee del bloque.

Si escribimos varias veces sucesivas sin que otro procesador lea de su bloque correspondiente, con invalidación podemos reducir el número de accesos (transferencias) a la red. Por otra parte, si deseamos que un procesador escriba un dato para que el resto lo lean podría ser más eficiente usar escritura con actualización, que disminuye en este caso los accesos a la red (notemos que con invalidación necesitamos un acceso a la red por cada caché que falle, pero con actualización con un único acceso a la red podemos actualizar todas las cachés). Cabe destacar que esta ventaja de la actualización no se da en arquitecturas que no implementan difusión. Podemos decir

que en general, la política de actualización genera un tráfico innecesario cuando los datos compartidos se leen por pocos procesadores.

La propagación de las actualizaciones o invalidaciones entre los procesadores se puede realizar:

- Con una **difusión** de los paquetes de actualización o invalidación a todas las cachés.
- Con el envío de los paquetes de actualización o invalidación sólo a aquellas cachés con copias del bloque, que son sólo las que necesitan recibirlo. Es decir, realizar un **envío selectivo**.

Para esta última alternativa, necesitamos mantener una tabla o directorio de memoria, que informe de las cachés que tienen copia de un determinado bloque para poder realizar la comunicación. Esta tabla tendría una entrada por cada dirección de memoria de cada caché y contendría el bloque que contiene, junto con bits de estado.

1.2.4. Protocolos de mantenimiento de coherencia

En una arquitectura UMA, podemos utilizar una red bus para las transferencias entre los procesadores y la memoria que comparten. Los buses implementan la difusión de forma natural. De esta forma, todos los paquetes enviados a la red son visibles por todos los componentes conectados al bus, de forma que todos ven las peticiones en el orden en el que se solicitan (dándose las dos condiciones para evitar situaciones de incoherencias). Todo esto hace que en el caso de los multiprocesadores UMA con red bus no sea necesarios mantener información de la cachés con copias de los bloques, pudiendo suprimir incluso el directorio de memoria del que antes se hablaba.

En este tipo de arquitecturas, es común el uso de **protocolos de espionaje** (*snoopy*), ya que todos los componentes pueden ver (espiar) dicho bus. Cada controlador de caché espía los paquetes del bus y actúa en consecuencia (si por ejemplo otro controlador solicita un paquete invalidado del que nuestra caché tiene acceso exclusivo y no está actualizado en memoria, nuestro controlador invalida la respuesta de la memoria y es él quien responde a la petición del paquete, devolviendo el paquete actualizado). Es por ello sencillo implementar protocolos de coherencia en una arquitectura que use buses. Sin embargo, los protocolos de espionaje no escalan bien debido a retardos que introducen otro tipo de redes¹.

En redes en las que la difusión es costosa de implementar o redes que requieren de una gran escalabilidad, se usan **esquemas basados en directorios**, en los que para reducir el tráfico, se envían los paquetes únicamente a las cachés implicadas (cachés con copia del bloque al que se accede). Es necesario por tanto el uso del directorio de memoria. Sin embargo, también obtenemos un cuello de botella al tener que acceder por cada procesador a dicho directorio. Se obtienen mejores prestaciones distribuyendo el directorio entre los módulos de memoria principal, de forma que el

¹Al tener que esperar a que todos los procesadores reciban el paquete enviado.

subdirectorio de cada módulo mantenga la información sobre sólo los bloques que contiene cada módulo. De esta forma, los diferentes subdirectorios pueden procesar peticiones en paralelo.

Cabe destacar que no son los únicos tipos de protocolos de coherencia, sino que hay también esquemas organizados en **jerarquía**, compuestos de protocolos de espionaje y directorios, que dependen de la red utilizada en cada nivel.

Resumiendo toda esta introducción a los protocolos de coherencia realizada, debemos tener claro que para diseñar un protocolo de mantenimiento de coherencia, debemos planificar:

- La política de actualización en memoria principal: escritura directa o posescritura.
- La política de propagación de escrituras entre cachés: escrituras con actualización o con invalidación.
- El comportamiento:
 - Los posibles estados de un bloque en caché y las acciones que el controlador de caché debe realizar ante eventos recibidos.
 - Los posibles estados de un bloque en memoria principal, junto con las acciones que el controlador de memoria principal debe hacer ante eventos.
 - Los paquetes que genera el controlador de memoria principal.
 - Saber relacionar las acciones con eventos y estados.

A continuación, vamos a estudiar cuatro protocolos de mantenimiento de coherencia, dos para multiprocesadores UMA con red bus (MIS y MESI) y dos para multiprocesadores NUMA en una placa (MSI con y sin difusión). Todos ellos usan posescritura y escrituras con invalidación, como cabría esperar.

Los protocolos de espionaje que estudiaremos se basan en la difusión de los paquetes asociados al mantenimiento de coherencia a todas las cachés. Se implementan de forma eficiente en sistemas basados en buses.

1.2.5. Protocolo MSI (*Modified-Shared-Invalid*) de espionaje

Describimos a continuación el protocolo MSI, el protocolo con menor número de estados que utiliza posescritura e invalidación. Debe su nombre a cada estado de un bloque en caché.

Estados de un bloque en caché

Modificado (M).

Un bloque modificado en caché es la única copia del bloque válida en todo el sistema de memoria.

- En caso de que otro módulo solicite este bloque por el bus, el controlador de su caché debe invalidar la respuesta de la memoria principal (la memoria principal siempre intentará responder)² y el controlador de caché debe responder con su propio bloque, que es el único válido.
- El controlador de su caché debe escribir dicho bloque en memoria en caso de ser extraído de su caché.
- El controlador de su caché debe invalidar el bloque si le llega por el bus una petición de invalidación del bloque correspondiente.

Compartido (S).

Un bloque compartido en caché indica que todas las copias de dicho bloque que pueda haber en la jerarquía de memoria están actualizadas.

- El controlador de su caché debe invalidar el bloque si le llega por el bus una petición de invalidación del bloque correspondiente.

Inválido (I).

Un bloque inválido en caché es un bloque que o no está físicamente en caché (esa posición de caché está vacía) o que está invalidado (por progradación de invalidaciones desde otra caché).

- Si el procesador de la caché accede a un bloque en estado inválido, enviará un paquete de petición del bloque por el bus de la red.

Podemos ordenar estos estados en relación al grado de disponibilidad del bloque por parte del procesador al que pertenece la caché en orden creciente por:

- Inválido.
- Compartido.
- Modificado.

El estado modificado supone que el procesador tiene el uso exclusivo del bloque, de forma que puede disponer de él tanto para leer como para escribir, sin informar al resto del sistema. Como el módulo que contiene al bloque es el único que dispone de una copia válida del mismo, se trata del encargado de responder a todas las peticiones de este por el bus.

Todos estos estados se implementan añadiendo a la tabla de caché de cada módulo (Tabla 1.2) una serie de bits. Necesitamos representar 3 estados, luego nos será suficiente con disponer de mínimo 2 bits por cada entrada de la tabla. Las implementaciones suelen añadir normalmente los bits de invalidez (indica si el bloque en dicha posición de caché es válido) y sucio (indica si el bloque en dicha posición de caché ha sido modificado) en relación a nuestro modelo de estados MSI. De esta forma:

²En caso de estar así implementado; puede haber implementaciones que no realicen esta función, como se verá en breves.

Estados	Bit de invalidez	Bit sucio	Ambos bits
M	0	1	01
S	0	0	00
I	1	0	10

Estados de un bloque en memoria

Según lo anteriormente explicado, podemos evitar establecer estados para bloques en memoria (habilitando que los controladores de caché puedan inhibir respuestas del controlador de memoria principal). Sin embargo, si se desea almacenar puede hacerse simplemente con dos estados:

Válido. El bloque está actualizado en memoria principal y puede haber una copia en una o varias cachés (sin acceso exclusivo).

- El controlador de memoria principal responde con el bloque si ve en el bus una petición con lectura de un bloque que en memoria principal es válido.

Inválido. El bloque no está actualizado en la memoria principal y hay una copia válida en alguna caché.

- En caso de que este bloque sea pedido por el bus, será el controlador de caché de la caché correspondiente quien proporcione el bloque.

En caso de desear implementar la validez o no de los bloques en memoria, nos bastaría con disponer de un bit de invalidez por bloque de memoria.

Paquetes que genera un controlador de caché

Hemos comentado varias veces que los distintos controladores de caché de cada nodo tienen que tener un trabajo en la red de comunicación, pero no hemos especificado cómo se realizan estas comunicaciones.

Un controlador de caché puede generar los siguientes tipos de transferencias como consecuencia de acciones en caché del procesador, o como consecuencia de paquetes recibidos por otros nodos. Puede generar paquetes de petición (comienzan por **Pt**) o de respuesta (comienzan por **Rp**).

Petición de lectura de un bloque **PtLec(B)**.

Se genera como consecuencia de una lectura con fallo de caché del procesador del nodo (evento **PrLec**) en relación al bloque **B**. El paquete contendrá la dirección del bloque **B**.

Como respuesta a esta petición, recibirá un paquete de respuesta con el bloque (**RpBloque(B)**) de memoria principal o de la caché que lo tiene en estado modificado, en caso de haberlo.

Petición de acceso exclusivo a un bloque con lectura de bloque **PtLecEx(B)**.

Se genera como consecuencia de una escritura con fallo de caché del procesador

(evento **PrEsc**) en un bloque inválido B en la caché. El paquete contendrá la dirección del bloque B.

Como respuesta se invalidarán las copias del bloque en otras cachés y memoria principal; y se recibirá un paquete de respuesta con el bloque (**RpBloque(B)**) de memoria o de la caché que lo tiene en estado modificado, en caso de haberlo.

Petición de acceso exclusivo a un bloque $PtEx(B)$.

Se genera como consecuencia de una escritura del procesador (evento **PrEsc**) en un bloque B en estado compartido en la caché (si estuviera en estado modificado, no hace falta generar este paquete). El paquete contendrá la dirección del bloque B.

Como respuesta se invalidarán las copias del bloque en otras cachés y memoria principal.

En ciertas implementaciones no existe este paquete; en su lugar se usa el paquete **PtLecEx(B)** descartando el paquete de respuesta (**RpBloque(B)**) que es enviado a través del bus.

Petición de posescritura de un bloque $PtPEsc(B)$.

Se genera por el reemplazo en caché de un bloque B en estado modificado, como consecuencia del acceso del procesador a un bloque que no se encuentra en caché. El paquete contendrá la dirección del bloque B, así como su contenido.

El procesador no espera ninguna respuesta.

Respuesta con bloque $RpBloque(B)$.

Se genera por el controlador de la caché que tiene el bloque B solicitado en estado modificado, cuando detecta por el bus una petición **PtLec(B)** o **PtLecEx(B)**.

Paquetes que genera el controlador de memoria principal

El controlador de memoria principal sólo genera paquetes de respuesta:

Respuesta con bloque $RpBloque(B)$.

Se genera como respuesta a paquetes de peticiones de un bloque B por **PtLec(B)** o **PtLecEx(B)**.

- Si la memoria guarda el estado de sus bloques de memoria (esto es, los controladores de caché no inhiben la respuesta de la memoria principal), espía el bus y sólo generará el paquete de respuesta si el bloque B se encuentra en estado válido en memoria.
- Si la memoria no guarda el estado de sus bloques de memoria, siempre reponderá con estos paquetes, siendo su respuesta inhibida por el controlador correspondiente.

Estado	Evento	Acciones del controlador	Estado final
	PrLec(B)		M
	PrEsc(B)		M
M	PtLec(B)	Genera RpBloque(B)	S
	PtLecEx(B)	Invalida copia local y genera RpBloque(B)	I
	Reemplazo(B)	Genera PtPEsc(B)	I
	PrLec(B)		S
S	PrEsc(B)	Genera PtEx(B)	M
	PtLec(B)		S
	PtLecEx(B)	Invalida copia local de B	I
	PrLec(B)	Genera PtLec(B) y recibe RpBloque(B)	C
I	PrEsc(B)	Genera PtLecEx(B) invalida en otras cachés y recibe RpBloque(B)	M
	PtLec(B)		I
	PtLecEx(B)		I

Tabla 1.3: Tabla de acciones del controlador de caché.

Transiciones de estado de un bloque

En la Tabla 1.3 podemos ver las acciones del controlador de caché de un nodo (los paquetes que genera y los cambios de estado que realiza sobre sus bloques) que provocan los eventos relacionados con un bloque B, teniendo en cuenta el estado del bloque en la caché (eventos del procesador o del controlador de caché del nodo, recibidos del exterior a través de la red en forma de paquete).

Fallo de lectura.

El procesador lee (PrLec(B)) y el bloque no está en caché (o está en estado inválido). El controlador de caché difunde un paquete de petición de lectura del bloque de memoria PtLec(B).

El estado del bloque en la caché será compartido. La copia del bloque en otras cachés también será compartido y en memoria, válido.

PtLec(B) provoca los siguientes efectos:

1. Si el bloque se encuentra en otra caché en estado modificado, su controlador deposita en el bus el paquete RpBloque(B) y pasa a estado compartido. La memoria también recoge el bloque del bus, pasando a estado válido (si tiene estados).
2. Si el bloque está compartido en otras cachés, la memoria proporciona el bloque a la caché que la solicita. El bloque sigue en estado compartido en cada una de las cachés.

Fallo de escritura al no estar el bloque en la caché.

El procesador escribe ($\text{PrEsc}(B)$) y el bloque no está en caché (o está en estado inválido). El controlador de caché difunde un paquete de petición de acceso exclusivo al bloque de memoria $\text{PtLecEx}(B)$.

El estado del bloque en la caché después de la escritura será modificado.

$\text{PtLecEx}(B)$ provoca los siguientes efectos:

1. Si la memoria tiene el bloque válido, lo deposita en el bus y pasa a estado inválido.
2. Si una caché tiene el bloque en estado modificado, deposita el bloque en el bus (invalidando la respuesta de la memoria) y pasa a estado inválido.
3. Si una caché tiene el bloque en estado compartido, pasa a estado inválido.

Acierto de escritura en bloque compartido.

El procesador escribe ($\text{PrEsc}(B)$) y el bloque está en caché en estado compartido. El controlador quiere acceso exclusivo al bloque, por lo que difunde un paquete de petición de acceso exclusivo al bloque $\text{PtEx}(B)$.

El estado del bloque en la caché después de la escritura será modificado³.

$\text{PtEx}(B)$ provoca los siguientes efectos:

1. Si la memoria tiene el bloque válido, lo deposita en el bus y pasa a estado inválido.
2. Si una caché tiene el bloque en estado modificado, deposita el bloque en el bus y pasa a estado inválido.
3. Si una caché tiene el bloque en estado compartido, pasa a estado inválido.

Acierto de escritura en bloque modificado.

El procesador escribe ($\text{PrEsc}(B)$) y el bloque está en caché en estado modificado. Como el nodo ya tiene acceso exclusivo al bloque, no se genera ningún paquete. El bloque sigue en estado modificado.

Acierto de lectura.

El procesador lee ($\text{PrLec}(B)$) y el bloque está en caché en estado compartido o modificado. No se genera ningún paquete y el bloque continúa en su mismo estado.

Reemplazo.

Fallo en el acceso a otro bloque y la política de reemplazo de la caché selecciona a B para hacer sitio al nuevo. Si el bloque reemplazado se encuentra en estado modificado, el controlador de caché difunde un paquete de posescritura en memoria $\text{PtPEsc}(B)$.

El estado del bloque en la caché pasa a ser inválido.

$\text{PtPEsc}(B)$ provoca el siguiente efecto:

1. El bloque se transfiere a memoria principal, pasando el estado del bloque en memoria a válido.

³Notemos que el acierto de escritura en un bloque compartido se trata de forma similar al fallo de escritura.

1.2.6. Protocolo MESI (*Modified-Exclusive-Shared-Invalid*) de espionaje

El protocolo que estamos a punto de ver también utiliza posescritura como política de actualización de memoria principal y escritura con invalidación como política para mantener la coherencia entre cachés, como cabría esperar.

Con el protocolo MSI, siempre que se escribía en la copia de un bloque en una caché se genera un paquete de petición con acceso exclusivo al bloque, aunque no haya copias en otras cachés que se tengan que invalidar. Esto generaba un tráfico innecesario por la red que degrada las prestaciones de las aplicaciones, especialmente en aplicaciones secuenciales. Es por esto que el protocolo MESI divide el anterior estado compartido en dos (con la filosofía de que si un bloque está en estado compartido en un único nodo no está siendo compartido realmente).

Un bloque en estado *exclusivo* será válido sólo en dicha caché y en memoria principal. Si un bloque está en estado exclusivo en un nodo y el procesador del nodo escribe en el bloque, no se generará paquete para solicitar uso exclusivo del bloque (invalidando copias), ya que ninguna otra caché tiene copias del bloque. Si un bloque está en estado exclusivo, entonces son dos los propietarios del bloque: la memoria principal y una única caché.

Reordenamos ahora el esquema de disponibilidad de bloques según su estado, desarrollando a continuación cada estado en este nuevo protocolo:

- Inválido.
- Compartido.
- Exclusivo.
- Modificado.

Estados de un bloque en caché

Modificado (M).

Si el bloque en la caché se encuentra en estado modificado, significa que ese es el único nodo del sistema con una copia válida del bloque, mientras que el resto de cachés y memoria tienen una copia desactualizada (no válida).

El controlador de su caché debe proporcionar el bloque si observa al espiar el bus que algún componente lo solicita y debe invalidar su propia copia si algún otro nodo solicita una copia exclusiva del bloque para su modificación.

Exclusivo (E).

Si el bloque en caché se encuentra en este estado, significa que es la única caché en el sistema con una copia válida del bloque: el resto de cachés tienen una copia no válida. La memoria tiene también una copia actualizada el bloque.

La caché debe invalidar su copia si observa al espiar el bus que algún nodo solicita una copia exclusiva del bloque para su modificación.

Compartido (C).

Supone que el bloque es válido en esta caché, en memoria y en al menos alguna otra caché.

Estado	Evento	Acciones del controlador	Estado final
	PrLec(B)		E
E	PrEsc(B)		M
	PrLec(B)		S
	PrLecEx(B)		I
I	PrLec(B) y no hay cachés con copias de B	Genera PtLec(B) y recibe RpBloque(B)	S

Tabla 1.4: Tabla de nuevas acciones del controlador de caché.

La caché debe invalidar su copia si al espiar el bus algún otro nodo solicita una copia exclusiva del bloque para su modificación.

Inválido (I).

Supone que el bloque no está físicamente en la caché, o si se encuentra, ha sido invalidado por el controlador como consecuencia de la escritura en la copia del bloque situado en otra caché.

En cuanto a los paquetes que usa MESI, son los mismos que MSI.

Transiciones de estado de un bloque

En la Tabla 1.4 podemos ver las nuevas acciones del controlador de caché de un nodo que provocan los eventos relacionados con un bloque B, teniendo en cuenta el estado del bloque en la caché que ahora origina el protocolo MESI frente a MSI (es decir, tener en cuenta la Tabla 1.3 y agregarle las acciones de la Tabla 1.4).

Detallamos las acciones que se cometen tras la disparación de cada evento con detalle.

Fallo de lectura.

El procesador lee (PrLec(B)) y el bloque no está en caché (o está en estado inválido). El controlador de caché difunde un paquete de petición de lectura del bloque de memoria PtLec(B).

El estado del bloque en la caché será pasar a ser compartido si hay copias del bloque en otras cachés y exclusivo en caso contrario. Se puede añadir una línea OR cableada que informe si hay cachés con copias del bloque solicitado. El estado en memoria será válido.

PtLec(B) provoca los siguientes efectos:

1. Si el bloque se encuentra en otra caché en estado modificado, su controlador deposita en el bus el paquete RpBloque(B) y pasa a estado compartido. La memoria también recoge el bloque del bus, pasando a estado válido (si tiene estados).
2. Si el bloque está compartido en otras cachés, la memoria proporciona el bloque a la caché que la solicita. El bloque sigue en estado compartido en cada una de las cachés.

3. Si el bloque se encuentra en estado exclusivo, pasa a estado compartido. En este caso, la respuesta con el bloque que llega a la caché del nodo solicitante procede de la memoria principal.

Hay implementaciones en las que si el bloque solicitado está disponible en estado válido en alguna caché, en lugar de proporcionar el bloque la memoria lo proporciona la caché. Es necesario aquí añadir hardware que realice esta funcionalidad (que decida qué caché seleccionar). Esta alternativa es interesante en sistemas con memoria físicamente distribuida (que probablemente use protocolos basados en directorios), ya que se puede proporcionar el bloque desde el nodo más cercano al que lo solicita, reduciendo tiempos.

Fallo de escritura al no estar el bloque en la caché.

El procesador escribe ($\text{PrEsc}(B)$) y el bloque no está en caché (o está en estado inválido). El controlador de caché difunde un paquete de petición de acceso exclusivo al bloque de memoria $\text{PtLecEx}(B)$.

El estado del bloque en la caché después de la escritura será modificado.

$\text{PtLecEx}(B)$ provoca los siguientes efectos:

1. Si una caché tiene el bloque en estado modificado, deposita el bloque en el bus (invalidando la respuesta de la memoria) y pasa a estado inválido.
2. Si una caché tiene el bloque en estado exclusivo o compartido, pasa a estado inválido.

Acierto de escritura en bloque compartido.

El procesador escribe ($\text{PrEsc}(B)$) y el bloque está en caché en estado compartido (es decir, está en algún otra caché también). El controlador quiere acceso exclusivo al bloque, por lo que difunde un paquete de petición de acceso exclusivo al bloque $\text{PtEx}(B)$.

El estado del bloque en la caché después de la escritura será modificado⁴.

$\text{PtEx}(B)$ provoca los siguientes efectos:

1. Si la memoria tiene el bloque válido, lo deposita en el bus y pasa a estado inválido.
2. Si una caché tiene el bloque en estado modificado, deposita el bloque en el bus y pasa a estado inválido.
3. Si una caché tiene el bloque en estado compartido, pasa a estado inválido.

Acierto de escritura en bloque modificado o exclusivo.

El procesador escribe ($\text{PrEsc}(B)$) y el bloque está en caché en estado modificado o exclusivo. Como no hay ningún otro nodo con acceso al bloque, no se genera ningún paquete. El bloque pasa a estado modificado si estaba en estado exclusivo y si no, no se modifica su estado.

⁴Notemos que el acierto de escritura en un bloque compartido se trata de forma similar al fallo de escritura.

Acierto de lectura.

El procesador lee ($\text{PrLec}(B)$) y el bloque está en caché en estado compartido, exclusivo o modificado. No se genera ningún paquete y el bloque continúa en su mismo estado.

Reemplazo.

Fallo en el acceso a otro bloque y la política de reemplazo de la caché selecciona a B para hacer sitio al nuevo. Si el bloque reemplazado se encuentra en estado modificado, el controlador de caché difunde un paquete de posescritura en memoria $\text{PtPEsc}(B)$.

El estado del bloque en la caché pasa a ser inválido.

$\text{PtPEsc}(B)$ provoca el siguiente efecto:

1. El bloque se transfiere a memoria principal, pasando el estado del bloque en memoria a válido.

1.3. Consistencia del sistema de memoria

1.3.1. Objetivos

Esta sección está orientada a adquirir los conocimientos necesarios para:

- Explicar el concepto de consistencia.
- Distinguir entre coherencia y consistencia.
- Distinguir entre el modelo de consistencia secuencial y los modelos relajados.
- Distinguir entre los diferentes modelos de consistencia relajados.

1.4. Sincronización

1.4.1. Objetivos

Tras esta sección, debería ser capaz de:

- Explicar por qué es necesaria la sincronización en multiprocesadores.
- Describir las primitivas para sincronización que ofrece el hardware.
- Implementar cerrojos simples, cerrojos con etiqueta y barreras a partir de instrucciones máquina de sincronización y ordenación de accesos a memoria.

2. Relaciones de Problemas