

УДК 621.391

doi 10.54708/22259309_2025_13277

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ПАМЯТИ ДЛЯ БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРА СПУТНИКА

А. Д. ПАНЧЕНКО¹

¹sanchez_ad@mail.ru

¹ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)

Аннотация. В работе рассматриваются современные технологии коррекции ошибок памяти, которые могут применяться в бортовом компьютере спутника. Уделяется внимание таким методам, как Chipkill, Extended ECC, Chipspare и SDDC, которые обеспечивают надежность и устойчивость систем к сбоям в условиях радиационного воздействия и других факторов риска. Анализируются принципы работы каждой технологии, их преимущества и недостатки, а также возможности применения в космических миссиях. Также обсуждается важность выбора подходящей технологии для обеспечения надежного хранения данных и предотвращения потерь информации, что является критически важным для успешного выполнения задач спутниковых систем.

Ключевые слова: коррекция ошибок; технологии памяти; потеря информации; хранение данных.

ВВЕДЕНИЕ

Современные космические технологии требуют высокой надежности и устойчивости к ошибкам, особенно в системах, работающих в экстремальных условиях. Бортовые компьютеры спутников обрабатывают и хранят критически важные данные, и любые ошибки в памяти из-за различных факторов, таких как радиация и отсутствие атмосферы, могут привести к серьезным последствиям. Для обеспечения надежности систем необходимо внедрять эффективные методы коррекции ошибок памяти. В данной статье рассмотрены различные технологии коррекции ошибок памяти, такие как Chipkill, Extended ECC, Chipspare и SDDC, также их особенности и недостатки.

РАЗНОВИДНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ КОРРЕКЦИЙ ОШИБОК

Ошибки в памяти можно разделить на две категории: одиночные (или случайные) ошибки, которые происходят спонтанно и обычно не требуют серьезных мер по исправлению, и многократные ошибки, возникающие одновременно в нескольких битах памяти. В традиционных вычислительных системах часто предполагается, что ошибки происходят независимо. Однако в современных компьютерах это предположение не всегда выполняется. Например, радиационные события могут вызывать множественные ошибки в одном и том же чипе памяти, что делает необходимым использование более сложных технологий коррекции ошибок, таких как:

1. Chipkill (IBM);
2. Extended ECC (Sun Microsystems);
3. Chipspare (Hewlett-Packard);
4. SDDC (Intel).

Последние три коррекции памяти не предполагают независимости ошибок в разных битах.

CHIPKILL. ИСПРАВЛЕНИЕ МНОЖЕСТВА ОШИБОК

Chipkill – это технология коррекции ошибок, разработанная компанией IBM, которая позволяет исправлять несколько ошибок, включая повреждение целого чипа памяти. Chipkill использует комбинацию кодов исправления ошибок (ECC) и избыточности, чтобы обеспечить высокую степень защиты данных.

Принцип работы модуля Chipkill заключается в том, что он делит данные на блоки и распределяет их по нескольким чипам памяти. Если один из чипов выходит из строя, система может восстановить данные с помощью оставшихся чипов. Это значительно повышает надежность системы и позволяет исправлять до четырех битов ошибок в одном слове. Например, модуль памяти IBM Chipkill DIMM может быть установлен без модификации в бортовой компьютер спутника на базе процессора Intel Xeon без какого-либо измеримого ухудшения производительности [1].

Обнаружение и исправление ошибок памяти выполняется в системном наборе микросхем. Код исправления ошибок (ECC) генерируется при записи и проверяется при чтении во всех системных операциях с памятью «прозрачно» для прикладных программ. Обнаруженная ошибка автоматически исправляется до передачи данных получателю. При этом событие ошибки регистрируется оборудованием, а системная BIOS уведомляется об исправлении ошибки и о месте, где она произошла. Набор микросхем также ведет учет исправленных ошибок, что позволяет BIOS выявлять DIMM-модули, в которых ошибки возникают и исправляются постоянно. Получив уведомление, система BIOS опрашивает регистры набора микросхем, чтобы определить, где произошла ошибка памяти (порядок такого опроса сильно зависит от конструкции конкретной системы, поэтому он и выполняется на уровне BIOS). Обнаружив модуль DIMM, вызвавший ошибку, BIOS регистрирует эту информацию в системном журнале. DIMM-модули легко заменить в процессе эксплуатации, для них требуется лишь предсказательное оповещение об ошибках и замене, поэтому нет необходимости локализовать ошибки с точностью до отдельной микросхемы на плате DIMM-модуля. Получая за сравнительно короткое время повторяющиеся сообщения об исправленных ошибках от одного и того же DIMM-модуля, BIOS отключает соответствующий механизм оповещения и регистрирует этот факт в журнале системы управления сервером. Это избавляет систему от дополнительной нагрузки, обусловленной обработкой всех ошибок памяти, поскольку постоянная ошибка DRAM иногда генерирует миллионы сообщений об исправлениях в минуту.

Программное обеспечение управления системой, поставляемое в составе многих серверов, анализирует системный журнал при каждом внесении записи системой BIOS. Ошибки единичных разрядов инициируют уведомления одного из трех возможных уровней: warning («предупреждение»), critical («критическая»), nonrecoverable («неустраняемая»). По-настоящему случайная ошибка вряд ли инициирует уведомление в стеке программы управления системой. Однако в случае постоянных неполадок в работе DIMM-модуля инициируется уведомление программе управления системой, после чего та назначает службе технической поддержки задание на замену неисправного DIMM-модуля. Постоянная ошибка, вызвавшая отключение механизма регистрации исправлений, в любом случае инициирует уведомление. Постоянные ошибки в одном разряде или ошибки, устраняемые средствами Chipkill, не вызывают отказа системы; тем не менее они увеличивают вероятность того, что очередная случайная ошибка приведет к критическому, неустранимому сбою. Поэтому администраторы системы должны внимательно следить за уведомлениями о дефектных DIMM-модулях и своевременно назначать службе технической поддержки задания на их замену [2].

Chipkill применяется в высокопроизводительных вычислительных системах, где требуется высокая степень надежности и доступности данных. Она также используется в центрах

обработки данных и облачных вычислениях, где потеря данных может привести к серьезным последствиям.

EXTENDED ECC. РАСШИРЕННЫЕ КОДЫ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК

Extended ECC – это усовершенствованная версия стандартной памяти ECC, разработанная компанией Sun Microsystems. Эта технология позволяет обнаруживать и исправлять большее количество ошибок, чем традиционные ECC.

Принцип работы модуля Extended ECC заключается в том, что он использует дополнительные биты для кодирования информации, что позволяет обнаруживать и исправлять ошибки в нескольких битах одновременно. Эта технология также включает в себя механизмы для обработки зависимых ошибок, что делает ее более эффективной в условиях реальных приложений. В отличие от Chipkill, Extended ECC фокусируется на исправлении множества битовых ошибок, в то время как Chipkill больше ориентирован на исправление ошибок, связанных с выходом из строя отдельных чипов памяти.

Extended ECC использует более сложные алгоритмы кодирования, которые могут включать в себя комбинации различных кодов (например, код Хэмминга) для достижения более высокого уровня коррекции. Когда система обнаруживает ошибку, Extended ECC использует избыточные биты для определения местоположения и типа ошибки. Затем он применяет алгоритмы коррекции для восстановления поврежденных данных. В случае одиночной ошибки система может просто изменить бит на правильное значение. Для двойных или множественных ошибок может потребоваться более сложный процесс анализа и восстановления.

Extended ECC широко используется в серверах и рабочих станциях, где требуется высокая степень защиты данных. Она также применяется в системах хранения данных, где надежность является критически важным фактором.

CHIPSPARE: РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ПАМЯТИ

Chipspare – это технология, разработанная Hewlett-Packard, которая использует резервные чипы памяти для замены неисправных. Эта система позволяет минимизировать влияние ошибок на общую производительность системы.

Принцип работы модуля Chipspare заключается в том, что он включает в себя использование дополнительных чипов памяти, которые могут быть активированы в случае выхода из строя основных чипов. Это позволяет системе продолжать функционировать без перерыва даже при наличии повреждений.

Chipspare применяет методы обнаружения ошибок, такие как ECC (Error-Correcting Code). Эти коды позволяют не только обнаруживать ошибки, но и исправлять их. Например, при наличии одного бита ошибки в слове памяти ECC может исправить эту ошибку, а при наличии двух битов — только обнаружить.

Системы Chipspare могут включать механизмы мониторинга состояния памяти, которые отслеживают работу чипов и выявляют потенциальные неисправности до того, как они станут критическими.

В некоторых случаях Chipspare может перепрограммировать адреса памяти для исключения неисправных ячеек из активного использования.

Chipspare используется в высоконагруженных системах, таких как серверы и системы хранения данных, где отказ одного из компонентов может привести к серьезным последствиям. Эта технология обеспечивает высокий уровень доступности и надежности.

SDDC: ДВОЙНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ДАННЫХ

SDDC (Single Device Data Correction) – это технология от Intel, которая обеспечивает двойное резервирование данных для повышения надежности хранения информации.

Принцип работы модуля SDDC заключается в том, что он использует два отдельных устройства хранения для записи одних и тех же данных. Если одно устройство выходит из

строю, система может восстановить данные с другого устройства. Такая функция позволяет минимизировать риск потери информации. А также эта технология позволяет системе работать эффективно даже при наличии ошибок в одном или нескольких битах.

SDDC может быть расширена до DDDC (*double-device data correction*) с использованием методов обнаружения ошибок, таких как коды Хэмминга с дополнительной четностью, которые исправляют одиночные ошибки и обнаруживают двойные ошибки (SECDED) [3]. Данная функция обеспечит защиту от сбоя любого отдельного чипа памяти.

SDDC применяется в серверах и высокопроизводительных вычислительных системах, где надежность является критически важным фактором. Она также используется в облачных вычислениях и центрах обработки данных.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ

Каждая из рассмотренных технологий имеет свои преимущества и недостатки:

1. Chipkill обеспечивает высокую степень защиты от множественных ошибок и подходит для систем, подвергающихся радиационному воздействию. Хотя добавление избыточности может снизить общую производительность системы, технология оптимизирована для минимизации этого влияния. Технология может быть интегрирована в существующие системы с ECC, что делает ее более доступной для внедрения. Недостатки: сложность реализации и стоимость. Chipkill требует более сложной логики для кодирования и декодирования данных по сравнению с традиционным ECC. А также может увеличить стоимость памяти из-за необходимости дополнительных компонентов для коррекции ошибок.

2. Extended ECC предлагает улучшенные возможности исправления ошибок и может быть эффективно использована в критических приложениях. Extended ECC часто является частью стандартов для многих типов памяти и систем, что облегчает интеграцию и совместимость с другими устройствами и технологиями. Extended ECC может быть более эффективным в условиях, где данные подвержены внешним воздействиям (например, радиации), что делает его подходящим для использования в аэрокосмической или военной области. Недостатки: использование Extended ECC может увеличивать нагрузку на процессор из-за дополнительных вычислений. В случае множественных ошибок в одном слове памяти Extended ECC не сможет их исправить, что может привести к сбоям системы или потере данных.

3. Chipspare позволяет поддерживать работоспособность системы даже при наличии повреждений, что важно для длительных космических миссий. Chipspare использует резервные чипы памяти для замены неисправных ячеек, что позволяет более эффективно управлять отказами на уровне чипов. Технология позволяет динамически перенаправлять операции чтения и записи, что минимизирует влияние неисправных элементов на производительность системы. В некоторых случаях Chipspare может снизить затраты на замену памяти, так как резервные чипы могут использоваться для исправления ошибок, а не замены всего модуля памяти. Недостатки: в системах с высокой нагрузкой вероятность одновременных отказов может превышать возможности Chipspare. В некоторых случаях управление перенаправлением операций может быть сложным и потребовать дополнительного программного обеспечения или настроек. Эффективность Chipspare зависит от наличия резервных чипов на модуле памяти. Если резервные ресурсы исчерпаны, это может привести к серьезным проблемам.

4. SDDC обеспечивает надежное резервирование данных и минимизирует риск потери информации. SDDC использует относительно простые алгоритмы кодирования, что облегчает интеграцию в системы. Недостатки: Эффективность SDDC может зависеть от конкретного аппаратного обеспечения, что может ограничить его применение в некоторых системах. Для реализации SDDC может потребоваться больше памяти для хранения дополнительных данных коррекции; SDDC может исправлять только одиночные ошибки. В случае множественных ошибок в одном модуле памяти система может потерять данные.

Выбор технологии зависит от конкретных требований миссии и условий эксплуатации бортового компьютера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение технологий коррекции ошибок памяти является ключевым аспектом обеспечения надежности бортовых компьютеров спутников. Технологии Chipkill, Extended ECC, Chipspare и SDDC предлагают различные подходы к решению проблемы ошибок в памяти, что позволяет адаптировать системы под специфические условия эксплуатации. Выбор подходящей технологии позволит повысить устойчивость космических систем к сбоям и обеспечить надежное хранение данных в любых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Enhancing** IBM Netfinity Server Reliability: IBM Chipkill Memory // IBM. 2000.
2. **Борзенко А.** Исправление ошибок памяти. Текст: электронный // Идеи и практики автоматизации. 2001. URL: <https://www.itweek.ru/idea/article/detail.php?ID=59972.html> (дата обращения: 07.12.2024).
3. **Kythe Dave K., Kythe.** Algebraic and Stochastic Coding Theory // CRC Press. Pp. 95–116.

ОБ АВТОРАХ

Панченко Александр Дмитриевич, аспирант каф. ИЭТИ.

METADATA

Title: Efficient memory error correction technologies for satellite onboard computer

Author: A.D. Panchenko¹

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ Sanchez_AD@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 77-81, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The paper discusses modern memory error correction technologies that can be used in the onboard computer of a satellite. Attention is paid to such methods as Chipkill, Extended ECC, Chipspare and SDDC, which ensure the reliability and resilience of systems to failures under radiation exposure and other risk factors. The operating principles of each technology, their advantages and disadvantages, as well as the possibilities of application in space missions are analyzed. The importance of choosing the right technology to ensure reliable data storage and prevent information loss, which is critical for the successful implementation of satellite system tasks, is also discussed.

Keywords: Error correction, memory technologies, information loss, data storage.

About author:

Panchenko Alexander Dmitievich, postgraduate student, Dept. of Electrical Engineering Institute (UUST).