



展 TENBO 望

理工学部会 企画 *

通信品質を小型加速器中性子源が支える！ —宇宙線による通信機器の誤動作を再現し、 未然に防ぐためのソフトウェア試験技術—



岩下 秀徳

Iwashita Hidenori

(NTT ネットワークサービスシステム研究所)

1 はじめに

近年、宇宙線によって生じる中性子線に因る通信機器のソフトウェアが増加しつつある。ソフトウェアというのは、永久的にデバイスが故障してしまうハードエラーとは異なり、一時的な故障でデバイスの再起動やデータの上書きによって回復する故障のことである。ソフトウェアが通信機器に発生すると、様々な故障モードを誘発し、通信サービスに影響を及ぼす可能性がある。通信機器では、このような故障も想定し通信サービスに影響を及ぼさないように設計をするが、ソフトウェアを再現させることが困難であるため、検証ができなかった。そのため、想定外の動作が起きることがあった。

そこで、NTTは北海道大学と共同で、小型加速器中性子源を用いて通信機器のソフトウェアを再現させ、効率的に通信機器のソフトウェアによる影響を測定する技術を開発した。本試験

を実施することにより、事前にソフトウェアの影響を把握でき、改善を行った後に実運用ネットワークへ通信機器を導入することにより、大幅な通信品質の向上が可能となる。

2 ソフトエラーが通信機器に及ぼす影響

ソフトウェアが通信機器に及ぼす影響として、未再現故障とサイレント故障がある。図1は未再現故障が発生した場合の保守フローを示している。通信機器では、故障が発生した場合、その故障を検出しネットワーク監視センタへ故障を示す警報を通知する。また、故障が検出された場合は、通信ルートを切り替え、通信サービスへの影響を回避する。故障したボードはメーカーの工場へ返却し再現試験や検査を行うがソフトウェアは一時的な故障であるため、メーカー工場では再現せず、異常なしと診断される。このようにソフトウェアが発生した場合、不必要な交換コスト、試験コストが発生してしまう。

* 中性子応用専門委員会

次に発生すると大きな問題となるサイレント故障である。サイレント故障というのは故障を通知しない故障モードのことである。通信機器の設計者は、故障が発生した場合、故障を検出し通知するように設計するが、まれに故障を通知できない故障モードが存在してしまう。この場合は、故障が発生しサービスに影響があってもネットワーク監視センタへ故障の通知がされないで、ユーザーから“接続できない”という申告が届く。ネットワーク監視センタでは、被疑の特定を行おうとするが故障の通知が届いていないため、被疑の特定に時間を要してしまう。これが長期化してしまうと重大故障となり社会的にも大きな影響を及ぼしてしまう。

3 宇宙線によってソフトウェアが発生するメカニズム

ソフトウェアの主な要因は、宇宙線によって生成される中性子線である。図2に示すように、宇宙では太陽や超新星爆発によって、陽子を主体とした高エネルギー粒子が飛び交っている。この高エネルギー粒子が地球の大気に突入すると、大気中の窒素原子核や酸素原子核と衝突し、核反応が発生する。このとき、原子核内部にあった中性子が飛散する。

大気中で発生した中性子の大部分は通常、半導体デバイスに突入しても透過して何ら影響を与えないが、まれに半導体デバイスを構成するシリコン原子核と核反応を起こし、電荷を持った様々な粒子を発生させる¹⁾。これが電氣的なノイズとなり、一時的なエラーであるソフトウェアを発生させる。

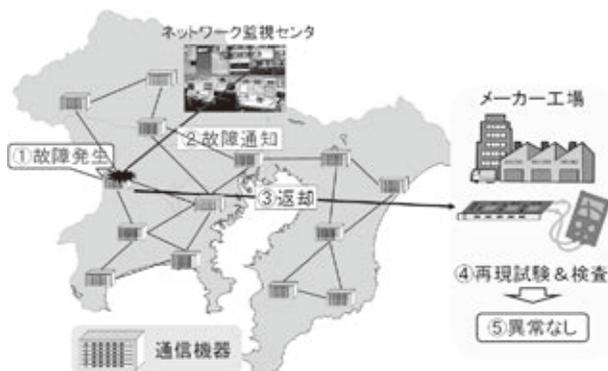


図1 未再現故障が発生した場合の影響

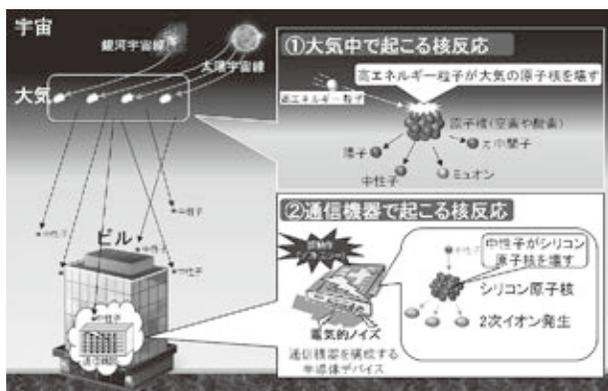


図2 宇宙線によるソフトウェア発生メカニズム

4 半導体プロセス技術の微細化により増加するソフトウェア

情報通信を支える通信機器は、年々増加する膨大な通信トラフィックを処理するため、大容量化・高機能化が求められており、それらに使われる半導体デバイスの高集積化・微細化も進んでいる。

しかし、半導体デバイスの高集積化・微細化に伴いソフトウェアの影響を受けやすくなる。特にSRAM (Static Random Access Memory) はソフトウェアの影響を受けやすく、微細化に伴う低電圧化により、急激にソフトウェア発生率が高くなる傾向にある²⁾。図3は、半導体プロセス技術の微細化によりソフトウェアが増加す

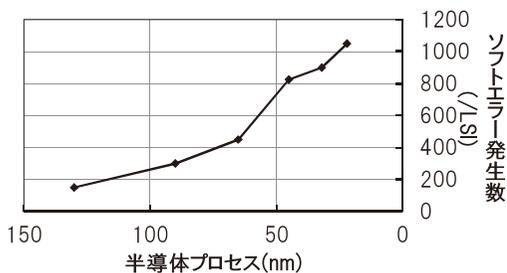


図3 半導体プロセス技術の微細化により増加するソフトエラー

る傾向を表している。通信機器では、高速処理が求められているため読み書きの速いSRAMが大量に使用されている。また、特にSRAMは論理回路を自由にカスタマイズ可能なFPGA(Field-Programmable Gate Array)にも大量に使用されている。例えば、最新のFPGAでFPGAメーカーが提供しているソフトエラー緩和機能を使用しない場合、故障率が10,000FITを超える場合がある。これは通信機器1台に、このようなFPGAを6個実装した通信機器を1,000台でネットワークを構築した場合、1日当たり約1.5回の故障が発生することになる。これでは、ネットワーク保守者はあまりの故障の多さに保守をすることが困難になってしまう。

5 通信機器のソフトエラー対策

前述のソフトエラーについて、対策手法は存在し、大きく分けて3つある。

1つ目は、エラー発生を抑制する方法で、ソフトエラーの発生しにくいデバイスを利用することである。例えば、構造的にソフトエラーが発生しないMRAM(Magnetoresistive Random Access Memory)や特殊な構成をした回路などがある。しかし、性能とコストを両立することが難しくなる。また、FPGAを使用せずにASIC(Application Specific Integrated Circuit)を使用するという方法もあるが、ASICは大量生産には向いているが、開発期間が長期化するという問題がある。

2つ目は、ECC(Error Check and Correct Memory)などのエラー訂正機能を備えるメモリーデバイスを利用することである。通常のECCは、1ビットのエラーを訂正できる。訂正処理はエラー発生時に即時に行われるため、エラーの発生を意識せずに利用を続けられる。なお、2ビット以上のエラーは訂正できず、検出のみである。2ビット以上のエラー訂正機能回路の実装は、開発コストや生産コストの面で負担が大きくなるため、採用は現実的ではない。

3つ目は、ソフトエラー発生直後にデータの書き直しや再起動をシステムが自律で行う対策である。この方法であれば、2ビット以上のエラーであっても検出さえできれば回復できる。また、FPGAメーカーが提供しているソフトエラー緩和機能も本方式であり、エラーを検出後、データの書き直しを行うという対策である。

6 小型加速器中性子源を用いたソフトエラー試験

前述のように、ソフトエラー対策は存在するが、難しいのは通信機器には非常に多くの部品が使用されており、故障検出回路の数も膨大である。そのため、実際に正常に動作するかどうか実機で確認することが重要である。しかし、従来ビットレベルのエラーを通信機器に発生させることは困難であった。

そこで、通信機器に適した効率的なソフトエラー試験が行えるように、北海道大学の小型加速器中性子源を用いて通信機器のソフトエラー試験システムを構築した³⁾。小型加速器中性子源は、スケジュールが柔軟に組めるというメリットがある。これは通信機器の開発段階では、トライ・アンド・エラー的な修正と再試験が重要であるからである。

本試験は、図4に示すように電子加速器によって加速された電子が鉛ターゲットに衝突すると発生する光核反応によって中性子を生成する。中性子源から遮蔽用のコンクリートを隔て

て通信機器を設置し、中性子を照射する。通信機器には、ユーザー信号を模擬するため測定器により常に通信トラフィックを流し、その影響を把握する。

本ソフトウェア試験システムでは、効率的に試験をするため、下記の特徴を有する。

(1) 広い照射範囲

通信機器のソフトウェアに対して弱い部分を早期に見付けるため、通常の通信機器全体を照射可能な直径25 cmのビーム系とした。

(2) 自然界の約300万倍の中性子強度

本試験では、前述のサイレント故障を検出する必要があるため、常に測定器で主信号の導通性と通信機器が通知する警報を監視する必要がある。そのため、中性子強度が強すぎて数秒単位でソフトウェアが発生してしまうと、サイレント故障を引き起こした原因のソフトウェアと、その他のソフトウェアを分類することができなくなるため、ソフトウェアが数分程度で発生する自然界の約300万倍の中性子強度とした。

(3) 複数台同時照射

効率的に照射をするため、複数台同時に試験が可能にさせた。その際、中性子ビームを照射しソフトウェアの発生を検出すると、装置ログの取得や正常な状態に回復させるため、それ以上ソフトウェアが発生しないように中性子ビームの照射を止める必要がある。中性子ビームを停止してしまうと、ほかの機器の照射も停止してしまい効率が悪くなる。そこで、図5に示すように、通信機器の高さをコントロールすることによって、各機器の照射/非照射を個別

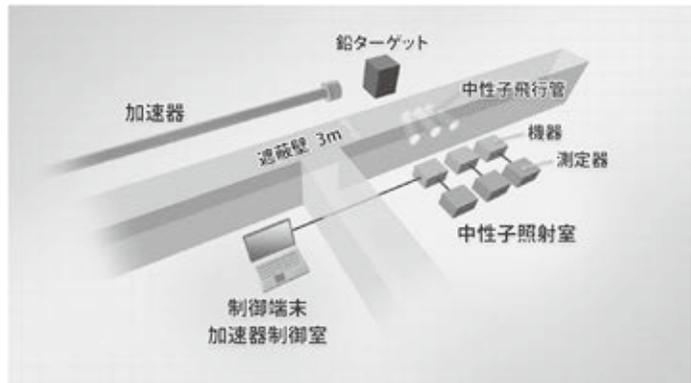


図4 ソフトエラー試験システム

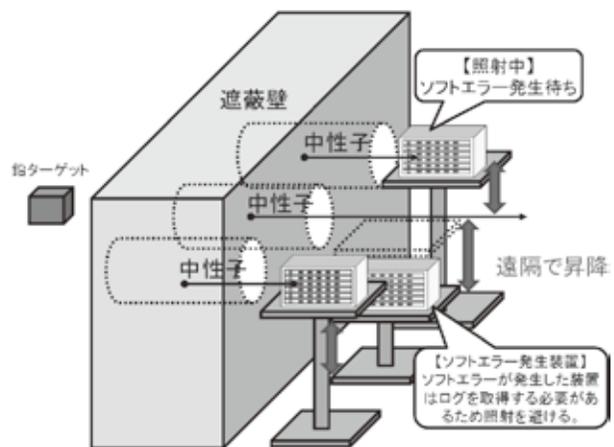


図5 複数台同時照射

にコントロールすることによって、照射効率を高めた。

(4) ビーム停止直後に作業可能

ソフトウェアが発生した際、場合によっては、機器に近づきボードを挿抜することによって回復させる必要がある。そのため、中性子ビーム停止直後に作業ができるように、遮蔽壁を隔てた所に通信機器を設置した。

7 ソフトエラー試験による品質向上結果

本試験によって得たソフトウェアによる故障発生率の低減の結果を図6に示す。この結果

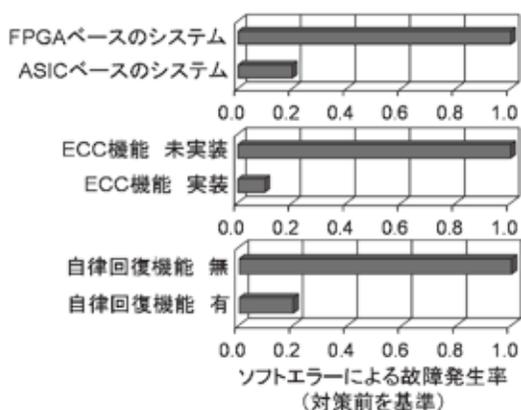


図6 ソフトエラー対策の効果

は、試験・修正・再試験を数回繰り返すことによって、このようにソフトエラー耐性を向上させることに成功した。また、障害処理に問題がある故障モードも検出し改善を行った。このように、ソフトエラー試験を行うことによって、短時間でその対策効果を把握でき、問題点があれば修正することが可能である。

8 将来の展望

本研究により、小型加速器中性子源を用いた

ソフトエラー試験が、通信機器の開発プロセスに非常に重要で、通信サービス品質を向上させるのに非常に有効であることがわかった。今後は、本試験技術を広めるため標準化活動等を行っていききたい。

【謝辞】

本研究は、北海道大学大学院工学研究院との共同研究の成果である。古坂道弘教授、鬼柳善明教授（現 名古屋大学）をはじめとした共同研究者の皆様深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hazucha, P. and Svensson, C., Impact of CMOS technology scaling on the atmospheric neutron soft error rate, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **47**(6), 2586–2594 (2000)
- 2) Ibe, E., *et al.*, Scaling Effects on Neutron-Induced Soft Error in SRAMs Down to 22nm Process, 3rd Workshop on Dependable and Secure Nanocomputing, June 2009, Lisbon, Portugal.
- 3) Furusaka, M., *et al.*, Activity of Hokkaido University Neutron Source, HUNS, *Phys. Procedia*, **60**, 167–174 (2014)