

多相クロック N out of M システムと その耐バースト雑音特性

苫米地 宣 裕

Multiple-Phase-Clock N out of M System and Its Burst Noise Tolerance Characteristics

Nobuhiro TOMABECHI

Abstract

This paper presents VLSI/WSI oriented and burst noise tolerant systems. The systems are designed as follows; ① the system is designed as the N out of M system, ② every subsystems are driven by the clock pulses whose phases are different from each other, ③ the error checking circuits are attached to every subsystems, ④ the erroneous datas in the faulty subsystems are exchanged by the correct datas of other correct subsystems.

1. ま え が き

近年、電磁環境の悪化が問題となっている^{1,2)}が、それと共に、電子機器の雑音対策、とくに高密度の雑音、あるいは、集中的に発生するバースト雑音に対する対策が重要な課題となっている³⁾。一方、VLSI/WSI⁴⁾は、システム全体が1枚のシリコンチップ/ウェーハ上に集積されるので、1個の雑音によって、システム全体が障害を受ける危険性を有している。このような雑音による障害の同時発生を回避する対策として、システムを3重化し、3相のクロックで駆動する方法^{5,6)}が提案されている。これは、雑音がクロックのタイミングと重なったとき発生し易いことから考えられた方法である。しかし、この3重化システムでは、単一雑音による障害は回避できるが、バースト雑音のように集中的に発生する雑音には対処することができない。

本論文では、バースト雑音による多重障害に耐えることができる VLSI システムを提案す

る。本システムは次のような構成手順をとる。① システムを N out of M システムとして構成する。② 各サブシステムの回路をそれぞれ互いに異なる位相のクロックで動作させる。③ 雑音により障害の生じたことを検出する回路を各サブシステムに付加する。④ 障害の生じたサブシステムの正しい値を他の正常なサブシステムの値から算出する回路を付加する。

提案したシステムの信頼度について解析した結果、次のようなことが明らかとなった。① 雑音による平均故障間隔 (MTBF) が、耐雑音構成をとらない場合の MTBF の (冗長なサブシステムの個数+1) 乗のオーダーとなる。② バースト雑音群に対する MTBF は、1個のバースト雑音に対する MTBF の (バースト雑音同士の平均間隔/1個のバースト雑音の持続時間) 倍となる。

提案したシステムは、一つの雑音による障害を単一サブシステムの障害に限定する機能と複数のサブシステムの障害を回復する機能を有するので、VLSI に適していると同時に、バースト雑音に対しても有効であると考えられる。以下、

平成7年12月15日受理
八戸工業大学 電気工学科 教授

本方法に基づくシステムを、「多相クロック N out of M システム (the multiple-phase-clock N out of M system)」とよぶことにする。

2. 多相クロック N out of M システム

2.1 システムと雑音のモデル

まず、雑音のモデルを次のように設定する。

[仮定 1] 雑音は集中的に発生し、これを間欠的にくり返す。この集中した雑音の集まりを、以下、バースト雑音とよぶ。また、間欠的に発生するバースト雑音の集まり全体を、以下、バースト雑音群とよぶ。

[仮定 2] バースト雑音群の中のバースト雑音の分布はランダムとする。

[仮定 3] 一つのバースト雑音の持続時間は、バースト雑音によらず一定とする。

[仮定 4] 一つのバースト雑音に含まれる雑音の密度は、バースト雑音によらず一定とする。

[仮定 5] 一つのバースト雑音に含まれる雑音の分布はランダムとする。

次に、雑音と対象とするシステムの関係について、以下の仮定を設ける。

[仮定 6] 1 個の雑音はインパルスで、その幅はシステムのクロックパルスより狭い。

[仮定 7] システムは、雑音発生タイミングがクロックパルスのそれと重なったとき障害を受ける。

[仮定 8] システムが雑音により障害を受けたとき、同じクロックで動作しているすべての回路が障害を受ける可能性がある。

仮定 7 は、通常用いられる同期式回路においては、クロックパルスによってゲートを開いたり、フリップフロップの状態遷移を行ったりするので、このタイミングで雑音が到来すると誤動作し易いという考え方^{5,6)}に基づいている。

次に、対象とするシステムに対して以下の条件を付する。

[条件 1] システム全体は、等しい機能を有するいくつかのサブシステムに均等に分割され

得る。

[条件 2] システムはリアルタイム動作をする。

[条件 3] システムは雑音により障害を受けたことを検出できる。

条件 2 は、障害が発生した時、再試行の時間的余裕がないことを意味している。条件 3 の雑音障害の検出には、例えば、誤り検出符号を用いる方法などが考えられる。しかし、本論文では、システムレベルの構成を論ずることとし、障害検出回路の具体的構成は問わないこととする。

2.2 提案するシステムの構成法

本論文で提案する多相クロック N out of M システムの構成法は次のようになる。

[手順 1] システムを N 個のサブシステムに均等に分割する。

[手順 2] R 個の冗長なサブシステムを付加する。

[手順 3] 各サブシステムをそれぞれ位相の異なるクロックパルスで動作させる。

[手順 4] 雑音による障害の発生を検出する回路を各サブシステムに設置する。

[手順 5] 障害の生じたサブシステムのデータを他の正常なサブシステムのデータから算出する回路を設置する。

本システム構成法の実施に当たって、手順 1 のシステムを N 個のサブシステムに分割する点が最大の問題となる。任意のシステムがそのような構成をとり得るとは限らない。次に、 N out of M システムの構成例を示す。

[システム例 1] 多重化システム

$N=1$ ととり、すなわち、非冗長なシステムは分割せず、これに R 個の冗長なサブシステムを付加する。障害の検出は障害検出回路で行うので、この構成によって、 R 個以内のサブシステムの障害を許容できる。通常の多重化システム⁷⁾に比較して、冗長なサブシステムの個数が少なく済む。

[システム例2] メモリシステム

メモリの並列出力ビットを N 個に分割して N 個のサブシステムを構成する。各サブシステムの対応するビットに対してパリティをとり、パリティビットからなるサブシステムを付加する。障害の生じたサブシステムの正しいデータを他の正常なサブシステムとパリティサブシステムのデータから回復する。

[システム例3] 剰余数系に基づくシステム^{8,9)}

算術演算システムを剰余数系に基づいて構成すると、システム全体を N 個のサブシステムに均等に分割することができ、かつ、 R 個の冗長なサブシステムを付加することにより、 R 個以内のサブシステムの障害を許容することができる。

以上提案したシステムにおいては、一つの雑音による障害は単一サブシステムの障害に限定され、かつ、 R 個以内のサブシステムの障害が許容される。従って、本システムは、VLSI に適していると同時に、バースト雑音に対しても有効であると考えられる。

3. システムの信頼度解析

3.1 提案したシステムのマルコフモデル

以下、とくにことわらない限り、1 個のバースト雑音に対するシステムの信頼度について論ずる。提案した「多相クロック N out of M システム」のマルコフモデルを図 1 に示している。図において、 $S_i (i=0 \sim R+1)$ は i 個のサブシステムが障害となった状態を示している。 S_0 が正常な状態、 S_{R+1} がシステムダウンの状態に対応している。 λ_i は雑音による S_i から $S_{i+1} (i=0 \sim R)$ への遷移確率を、 μ_i は S_i から $S_{i-1} (i=1 \sim R)$ への回復確率を示している。

ある一つのサブシステムが障害の状態にあるとき、次に到来した雑音のタイミングが同一のサブシステムのタイミングの場合は、障害を受けたサブシステムの個数は変わらない。この障

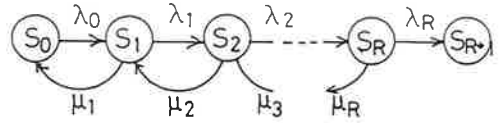


図1 提案したシステムのマルコフモデル

害が重なる効果を考慮に入れると、 λ_i は次式で与えられる。ただし、 T_N は平均雑音間隔を表わしている。

$$\lambda_i = (M - i) / (MT_N) \quad (1)$$

また、 μ_i は S_i から S_{i-1} に回復する時間 w_i の逆数に等しい。 w_i も一般には、 i の値によって異なるが、ここでは、解析を容易にするため w_i は i によらず一定とし、これを w と表わす。このとき、 μ_i も一定値となる。これを μ と表わすこととする。このとき、

$$\mu = 1/w \quad (2)$$

3.2 単一のバースト雑音に対する信頼度

図 1 のマルコフモデルに従って、単一のバースト雑音に対する信頼度を求める。まず、状態遷移方程式を立てると次のようになる¹⁰⁾。ただし、 $P_i(t) (i=0 \sim R+1)$ は、システムが時間 t において、状態 S_i にある確率を表わしている。

$$\begin{aligned} dP_0(t)/dt + \lambda_0 P_0(t) - \mu P_1(t) &= 0 \\ dP_1(t)/dt - \lambda_0 P_0(t) + (\lambda_1 + \mu) P_1(t) - \mu P_2(t) &= 0 \\ dP_2(t)/dt - \lambda_1 P_1(t) + (\lambda_2 + \mu) P_2(t) - \mu P_3(t) &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ dP_{R-1}(t)/dt - \lambda_{R-2} P_{R-2}(t) + (\lambda_{R-1} + \mu) P_{R-1}(t) \\ - \mu P_R(t) &= 0 \\ dP_R(t)/dt - \lambda_{R-1} P_{R-1}(t) + (\lambda_R + \mu) P_R(t) &= 0 \\ dP_{R+1}(t)/dt - \lambda_R P_R(t) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、初期条件は次のようになる。

$$P_0(0) = 1, P_i(0) = 0 (i=1, 2, \dots, R+1) \quad (4)$$

式 (3) をラプラス変換し、行列を用いて表現すると次のようになる。ただし、 $P_i^*(s) (i=0, 1, \dots, R+1)$ は、 $P_i(t)$ のラプラス変換を表わしている。

$$\begin{bmatrix} S+\lambda_0 & -\mu & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ -\lambda_0 & s+\lambda_1+\mu & -\mu & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_1 & s+\lambda_2+\mu & -\mu & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & -\lambda_{R-1} & s+\lambda_R-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & -\lambda_R & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^*(s) \\ P_1^*(s) \\ P_2^*(s) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_R^*(s) \\ P_{R+1}^*(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

本システムでは R 個の障害まで許容できるから、システムの信頼度 $R(t)$ のラプラス変換 $R^*(s)$ は次のようになる。

$$R^*(s) = P_0^*(s) + P_1^*(s) + \dots + P_R^*(s) \quad (6)$$

このとき、本システムの平均故障間隔 (MTBF) T_m は次のように求まる¹⁰⁾。

$$T_m = \lim_{s \rightarrow 0} R^*(s) \quad (7)$$

式 (5) を解いて各 $P_i^*(s)$ を求め、これを式 (6)、(7) に代入すると、次のような関係が得られる。

$R=0$ のとき

$$T_m = 1/\lambda_0$$

$R=1$ のとき

$$T_m = (\mu + \lambda_0 + \lambda_1) / (\lambda_0 \lambda_1)$$

$R=2$ のとき

$$T_m = \{ \mu^2 + \mu(\lambda_0 + \lambda_1) + (\lambda_0 \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_0) \} / (\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2)$$

$R=3$ のとき

$$T_m = \{ \mu^3 + \mu^2 \lambda_0 + \mu(\lambda_0 \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_0) + \lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 \lambda_0 + \lambda_3 \lambda_0 \lambda_1 \} / (\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)$$

よって、次式が得られる。

$$T_m = \{ \mu^R + \mu^{R-1}(\lambda_0 + \lambda_1) + \mu^{R-2}(\lambda_0 \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_0) + \dots + \lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{R-1} + \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_R + \dots + \lambda_R \lambda_0 \dots \lambda_{R-2} \} / (\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_R) \quad (8)$$

ここで、 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_R \ll \mu$ の条件を考慮する

と、

$$T_m = \mu^R / (\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_R) \quad (9)$$

$\mu = 1/w$, $\lambda_i = (M-i)/(MT_N)$ を代入すると

$$T_m = T_N^{R+1} M^R / \{ w^R (M-1)(M-2)\dots(M-R) \} \quad (10)$$

以上の結果より、次のような知見が得られる。

[知見1] T_m は T_N^{R+1} のオーダーとなる。すなわち、 T_m は耐雑音構成をとらないシステム ($R=0$ の場合) の MTBF の $(R+1)$ 乗のオーダーとなる。

[知見2] 冗長なサブシステムが1個増加することに T_m は T_N/w 倍となる。

次に MTBF の具体的な値を求めてみる。

[計算例1]

典型的な値として、 $T_N = 10^{-3}$ (sec), $w = 10^{-4}$ (sec), $N = 5$ (すなわち、 $M = 5 + R$) とする。

$$R=0 \text{ のとき} \quad T_m = 10^{-3} \quad (\text{sec})$$

$$R=1 \text{ のとき} \quad T_m = 1.2 \cdot 10^{-2} \quad (\text{sec})$$

$$R=2 \text{ のとき} \quad T_m = 1.6 \cdot 10^{-1} \quad (\text{sec})$$

$$R=3 \text{ のとき} \quad T_m = 2.4 \quad (\text{sec})$$

本例のような、平均雑音間隔: T_N と回復時間: w が近接している場合は、MTBF は小さな値となる。

以上の解析は、バースト雑音が無限に持続すると仮定して行っている。実際のバースト雑音の持続時間は有限なので、その条件下では MTBF はより大きな値となると考えられる。

3.3 バースト雑音群に対する信頼度

これまで、1個のバースト雑音に対する信頼度、すなわち、バースト雑音が無限に持続する場合の信頼度について論じてきた。以下に、バースト雑音群に対する信頼度、すなわち、バースト雑音の発生が間欠的に起こる場合の信頼度について論ずる。

1個のバースト雑音の持続時間を T_G 、バースト雑音同士の平均間隔を T_{NN} 、1個のバースト雑音に対するシステムの MTBF を T_m 、バースト雑音群に対するシステムの MTBF を T_{mm} と表わす。1個のバースト雑音の持続時間 T_G が経過したときのシステムの信頼度 R は、信頼度関数を近似的に $\exp(-t/T_m)$ と表わすことができるので、 $R = \exp(-T_G/T_m)$ となる。この値は、バースト雑音群の下で、バースト雑音同士の平均間隔 T_{NN} だけ経過した後のシステムの信頼度に等しいと見なすことができる。バースト雑音群の中のバースト雑音の分布はランダムと仮定しているので、バースト雑音群に対するシステムの信頼度関数は指数関数となる。よって、次の関係が成り立つ。

$$\exp(-T_G/T_m) = \exp(-T_{NN}/T_{mm}) \quad (11)$$

よって、

$$T_{mm} = T_m T_{NN} / T_G \quad (12)$$

すなわち、次の知見が得られる。

[知見3] バースト雑音群に対する MTBF は、1個のバースト雑音に対する MTBF を (バースト雑音同士の平均間隔/1個のバースト雑音の持続時間) 倍したものとなる。

知見3において、(バースト雑音同士の平均間隔/1個のバースト雑音の持続時間) は、(雑音休止時間/雑音持続時間) と考えることができる。これより、バースト雑音群における時間の経過は、単一バースト雑音における時間の経過を (雑音休止時間/雑音持続時間) 倍に拡大したものに相当することが分かる。

なお、式 (12)、または、知見3は耐雑音構成をとった場合について示しており、耐雑音構成をとらない場合の MTBF はバースト雑音の平均間隔: T_{NN} に等しくなる。

次に T_{mm} の具体的な数値を求めてみる。

[計算例2]

典型的な値として、 $T_N = 10^{-3}$ (sec), $w = 10^{-4}$ (sec), $T_G = 10^{-2}$ (sec), $T_{NN} = 10^4$ (sec), $N = 5$ とすると

$$R=0 \text{ のとき} \quad T_{mm} = 10^4 \quad (\text{sec})$$

$$R=1 \text{ のとき} \quad T_{mm} = 1.2 \cdot 10^4 \quad (\text{sec})$$

$$R=2 \text{ のとき} \quad T_{mm} = 1.6 \cdot 10^5 \quad (\text{sec})$$

$$R=3 \text{ のとき} \quad T_{mm} = 2.4 \cdot 10^6 \quad (\text{sec})$$

上記数値は、 T_{mm} が T_m の 10^6 倍となること、および、 T_{mm} の値が現実的な値となることを示している。

4. む す び

本論文では、バースト雑音に対して耐性を有する VLSI システムとして、「多相クロック N out of M システム」とよぶ次のようなシステムを提案した。

① システムを N out of M システムとして構成する。

② 各サブシステムを互いに異なる位相のクロックパルスで駆動する。

③ 雑音による障害の発生を検出する回路を各サブシステムに付加する。

④ 障害の生じたサブシステムの正しい値を他の正常なサブシステムの値から算出する回路を付加する。

提案したシステムは、一つの雑音による故障を単一サブシステムの故障に限定する機能と複数のサブシステムの故障を回復する機能を有するので、VLSI/WSI のように全システムが狭い空間に集積されるようなシステムに適すると同時に、バースト雑音のように集中的に発生する雑音に対しても有効となると考えられる。

本システムの問題点は、クロックを多相とすることにより、システムの演算速度が(1/位相の数)に低下することである。従って、本システムは、障害発生時に再試行する余裕はないが、多相とすることによる演算速度の低下は問題とならないような応用に有効であると言える。

また、本論文では、N out of M システムの例として、多重化システム、メモリシステム、および、剰余数系に基づくシステムを示したが、今後、更に異なる形態のシステムについても検討する予定である。

参考文献

- 1) 越後, 高木: “環境電磁工学 (EMC) と高信頼性”, 計測と制御, Vol. 24, No. 4, pp. 296-300 (1985-04).
- 2) 山口宏二: “EMC/EMI”, 電子情報通信学会誌, Vol. 78, No. 9, p. 825 (1995-09).
- 3) 高木 相: “EMC/EMI とその将来”, 計測と制御, Vol. 29, No. 5, pp. 400-403 (1990-05).
- 4) E.E. Swartzlander, Jr: “Wafer Scale Integration”. Kluwer Academic Publisher (1989).
- 5) M. Kameyama and T. Higuchi: “Design of dependent-failure-tolerant microcomputer system using tripple modular redundancy”, IEEE Trans. Comput., C-29, pp. 202-206 (Feb. 1980).
- 5) 亀山, 樋口: “マイクロコンピュータシステムの高信頼化”, 計測と制御, Vol. 24, No. 4, pp. 319-324 (1985-04).
- 7) 当麻, 南谷: “フォールトトレラントシステム”, 信学誌, Vol. 63, 10, pp. 1031-1041 (1980-10).
- 8) 苫米地宣裕: “WSI システムの耐雑音構成法”, 電子情報通信学会技術報告, VLD94-104, pp. 57-64 (1995-01).
- 9) 苫米地宣裕: “剰余数系に基づく WSI 向き高信頼システム構成法”, 電子情報通信学会論文誌 D-I, vol. J78-D-I, No. 12, pp. (1995-12).
- 10) 原田, 二宮: “信頼性工学”, 養賢堂 (1977).