

9. スイッチング電源のEMI低減技術

9-1 スペクトラム拡散技術

9-2 従来デジタル変調方式

9-3 アナログノイズ変調方式

9-4 シミュレーション結果

9-5 新M系列信号発生回路

9. スイッチング電源のEMI 低減技術

9-1 スペクトラム拡散によるEMI低減

(1) 基本構成とPWM信号変調方式

●基本構成（クロック使用電源）

* 鋸歯状波発生回路の基本クロックを変調

位相（位置）変調、周波数変調

* デジタル変調とアナログノイズ変調

白色雑音による変調が好ましい

⇒ 発生困難

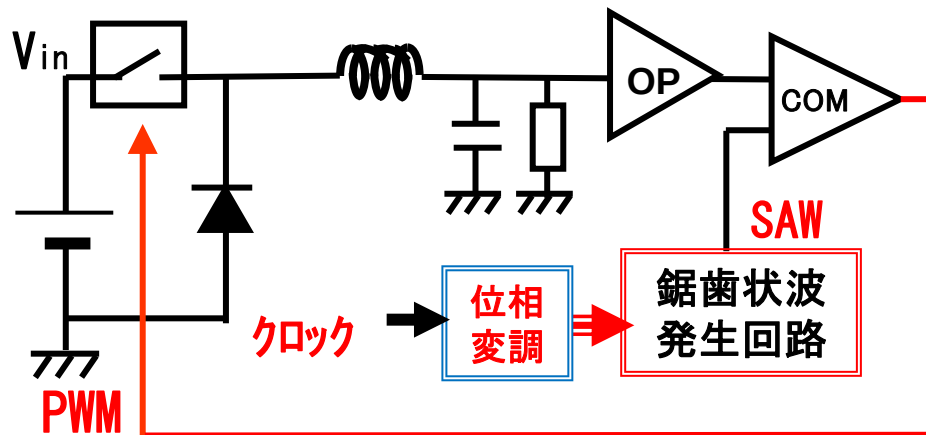
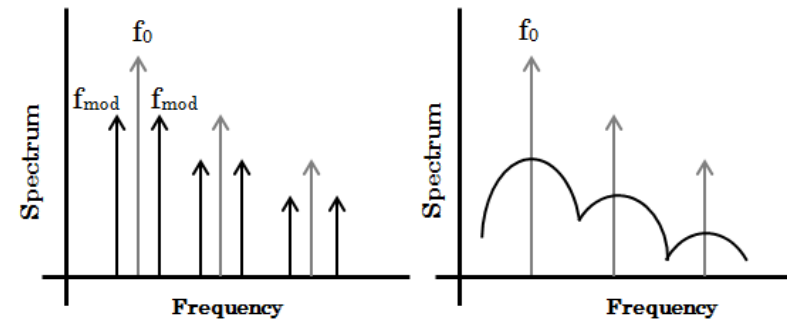


図9.1 スイッチング電源のスペクトラム拡散



(a) Digital Spread

(b) Analog Spread

図9.3 変調方式とスペクトラム拡散

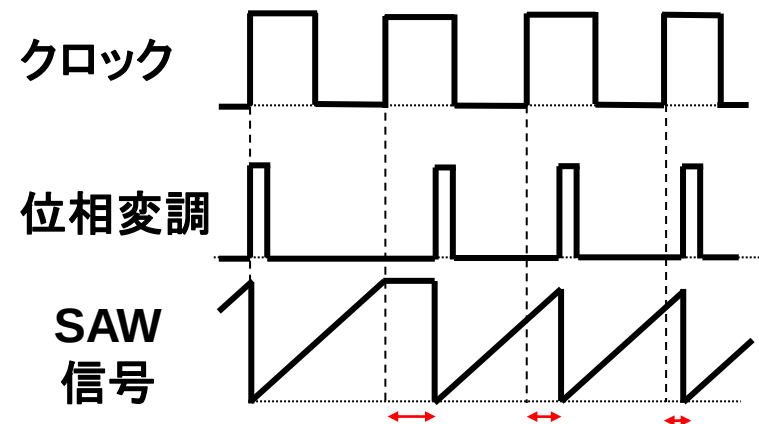


図9.2 波形図

(2) M系列信号発生回路

● 原始多項式

* 1周期に $(2^n - 1)$ 個のレベル出現

* 3次式: $G(s) = x^3 + x^2 + 1$

$$G(s) = x^3 + x + 1$$

* 基本形: ブール代数に従う

+ : Ex-OR、+1 = 反転

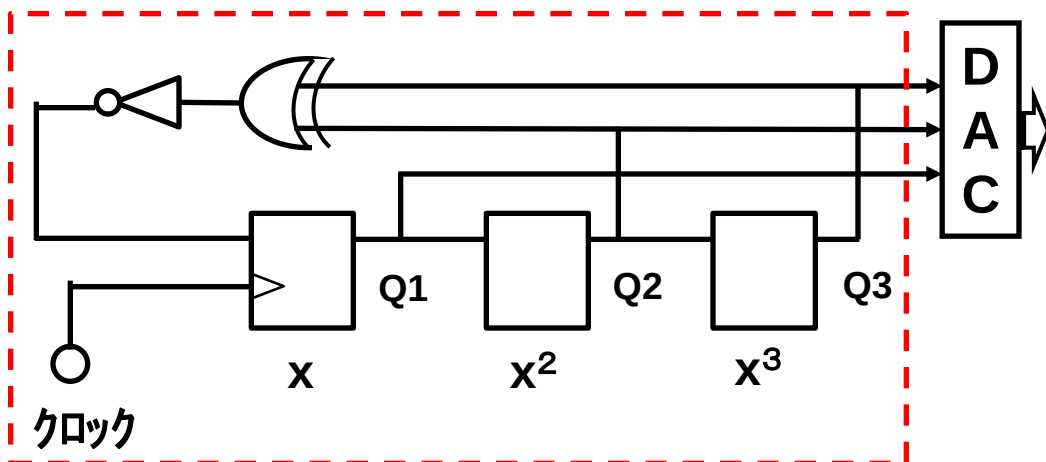
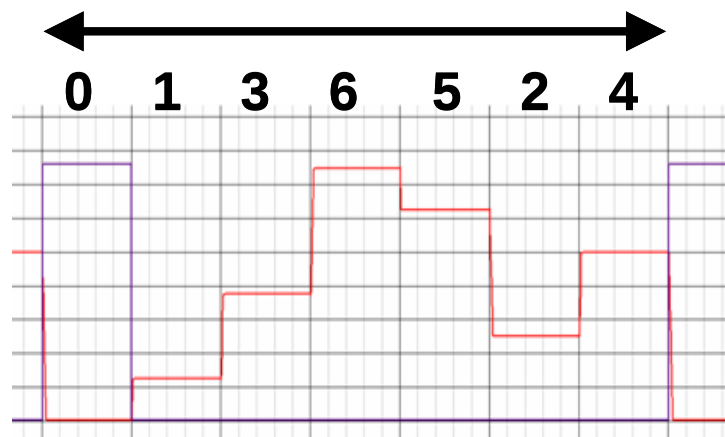
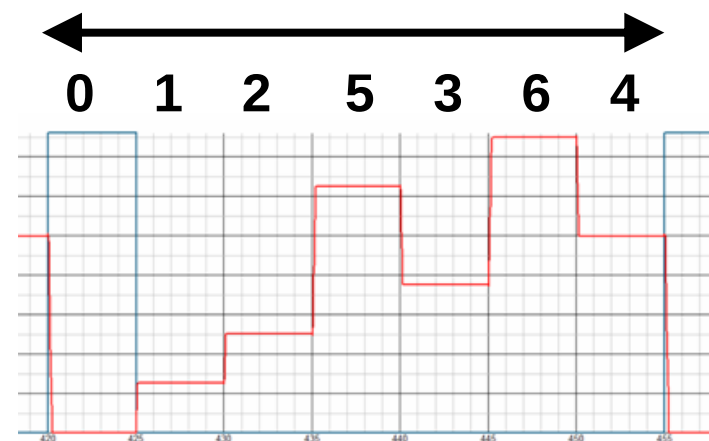


図9.4 M系列信号発生回路(3ビット)



(a) $x^3 + x^2 + 1 = 0$



(b) $x^3 + x + 1 = 0$

図9.5 M系列出力信号(3ビット)

9-2 従来デジタル変調方式

- クロック信号の多段位相シフト: n ビットの場合: 2^n 段シフト
- シフトクロックを一つセレクト : M系列回路ランダム信号利用

★ 10ビット程度必要: 1024段のシフター、セレクトタ必要

クロック周期 T_0 の半分をシフト領域とすると、200kHz($T_0=5\mu\text{s}$)の場合

シフトクロック周波数: $F_{ck}=400\text{MHz}$ 必要

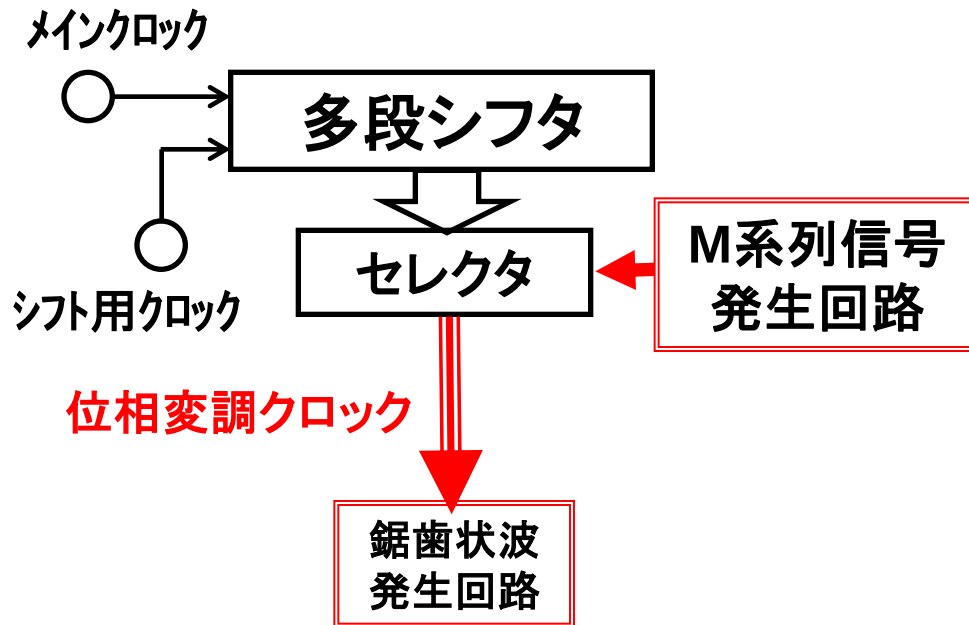


図9.6 デジタル変調回路

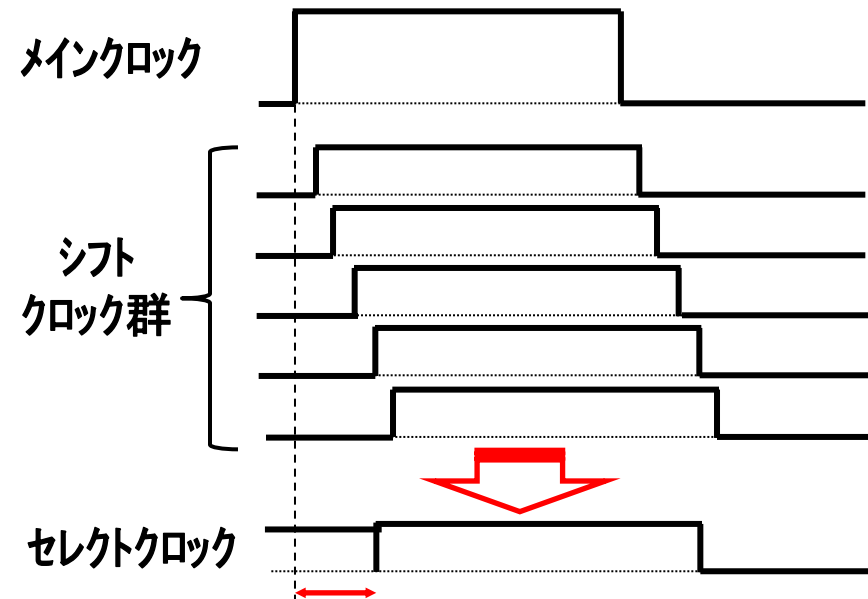


図9.7 シフトクロック波形

9-3 アナログノイズ変調方式

● 擬似アナログノイズ

* M系列出力+LPF ⇒ 擬似アナログノイズ

* 鋸歯状波との比較による位相変調

⇒ 電源内鋸歯状波発生回路用クロック

★7クロックの周期性有り ⇒ 周期長の拡大必要

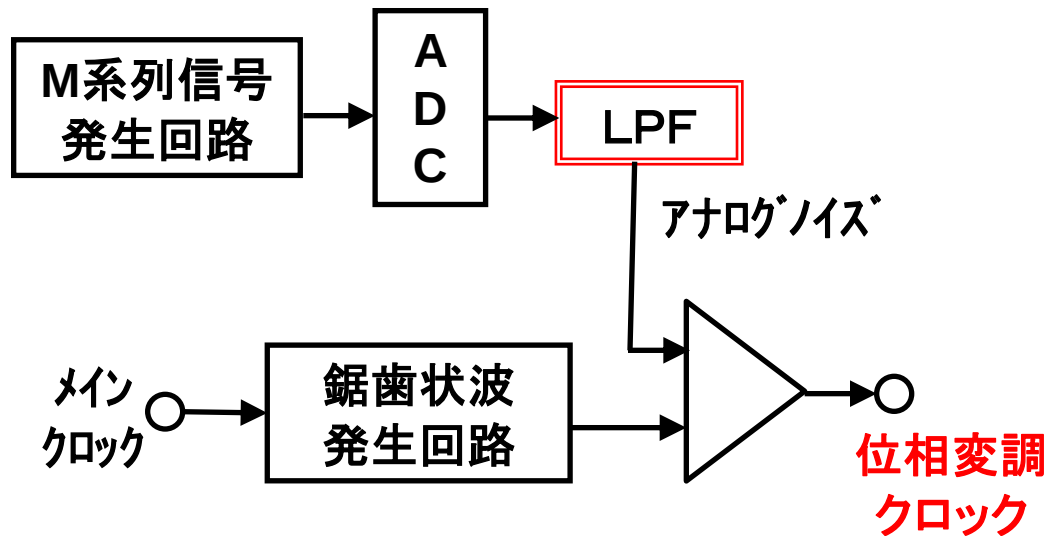
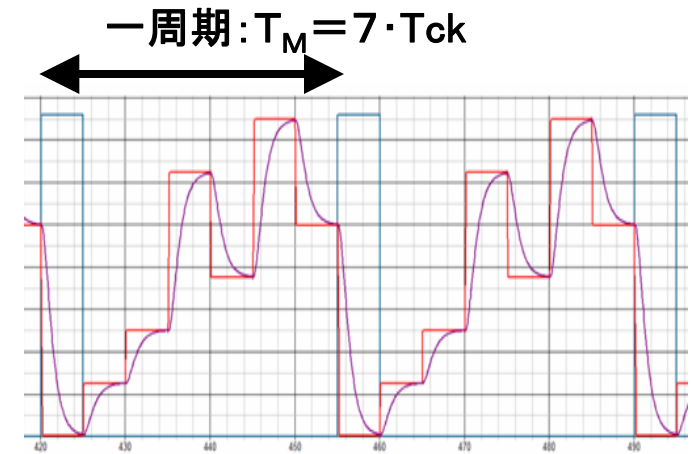
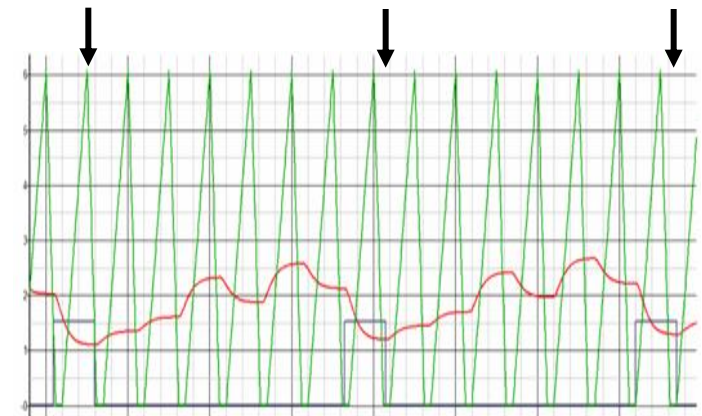


図9.8 擬似アナログノイズ位相変調回路



(a) M系列+LPF = アナログノイズ



(b) 位相変調された鋸歯状波

図9.9 アナログノイズと位相変調信号

9-3 アナログノイズ変調方式

● 擬似アナログノイズ+LPF+PLL

上記LPF 出力により 周波数変調

PLL特性を振動気味に設定(図9.12)

⇒ 非周期性への展開

* 鋸歯状波との比較による位相変調

⇒ 電源内鋸歯状波発生回路用クロック

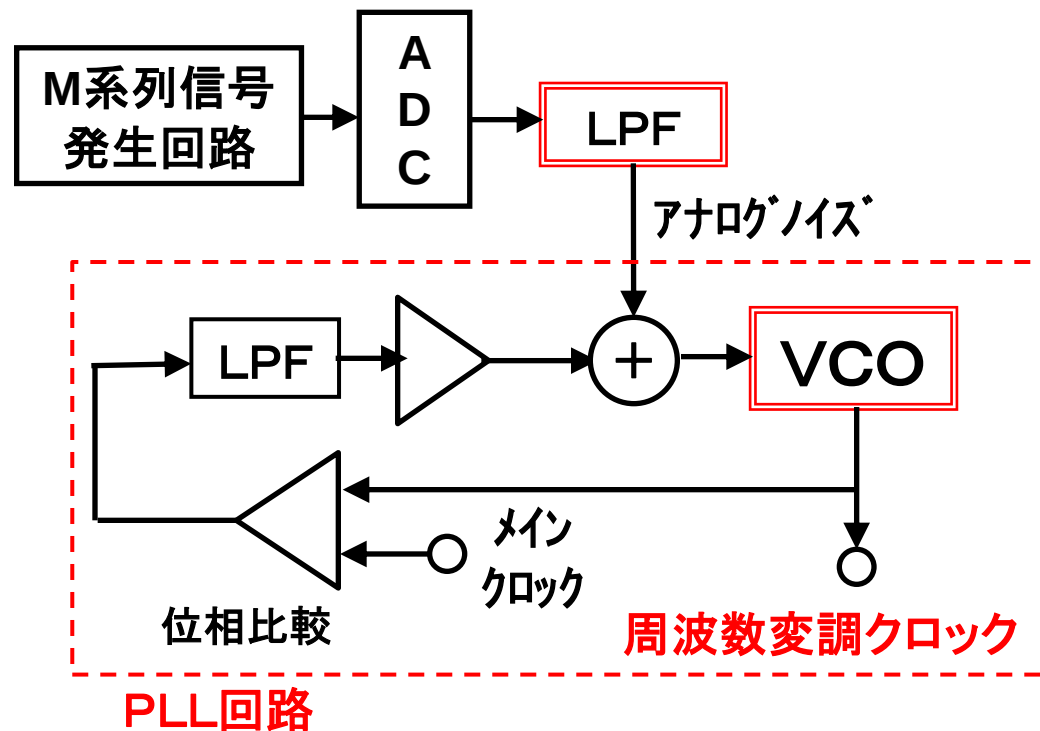


図9.10 PLLを用いた周波数変調回路

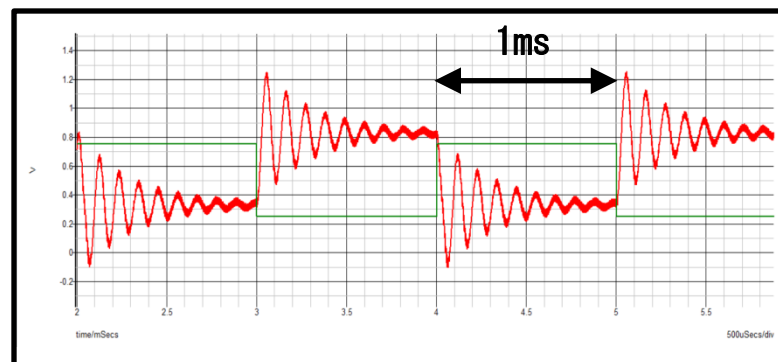


図9.12 PLL回路のステップ応答

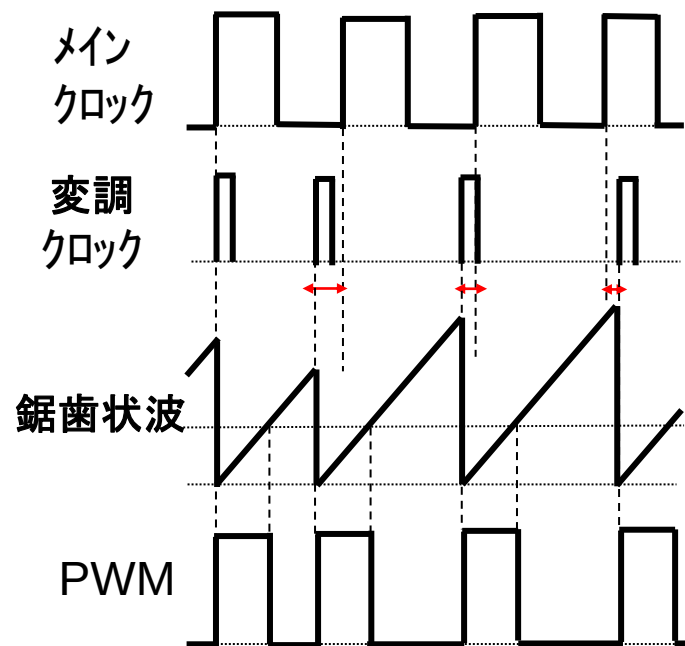


図9.11 周波数変調クロックと鋸歯状波

9-4 シミュレーション結果

● シミュレーション条件 (3ビット)

- * 電源PWMスペクトラム
- * 条件: $V_{in}=10V$, $V_o=5.0V$, $I_o=0.5A$
- * $F_{ck} = 200 \text{ kHz}$

★ スペクトラム拡散結果

- ・ 基本周波数 (200 kHz)
 $3.15V \Rightarrow 2.0V$ (−2.0 dB)
- ・ 5倍高調波 (1.0 MHz)
 $0.65V \Rightarrow 0.15V$ (−6.4 dB)

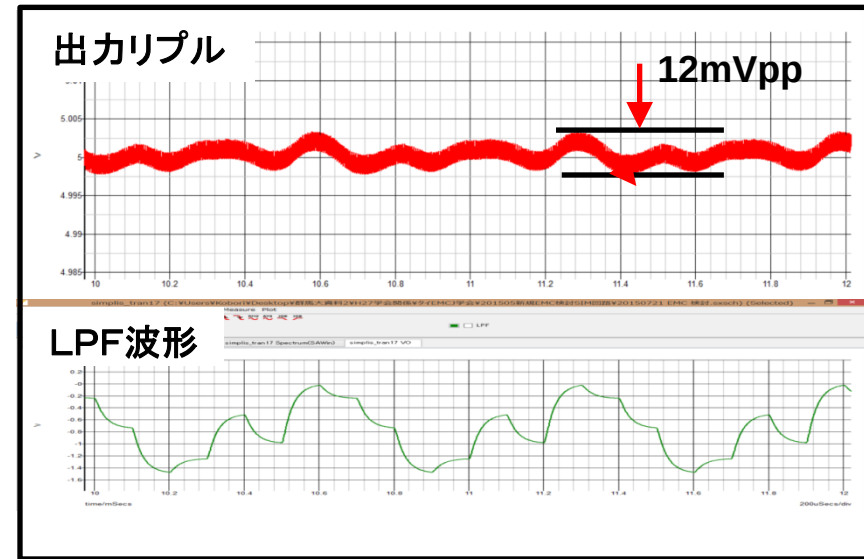


図9.17 出力リップル & アナログノイズ (LPF変調)

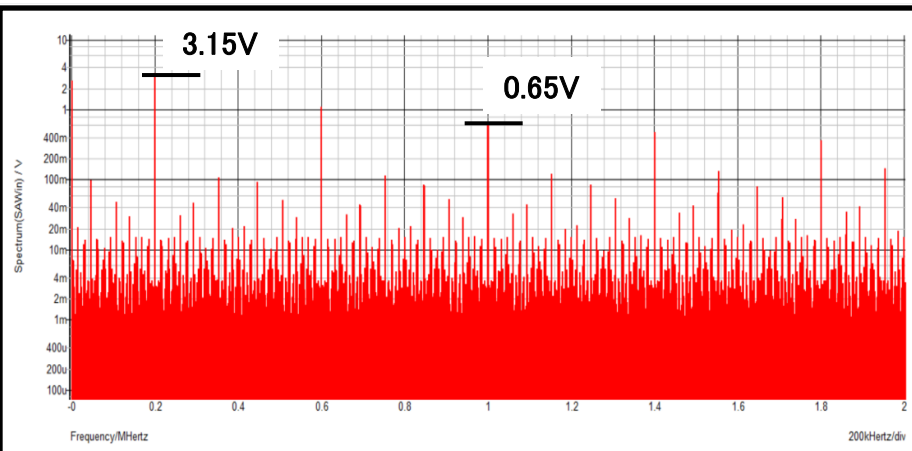


図9.15 PWMスペクトラム (変調無)

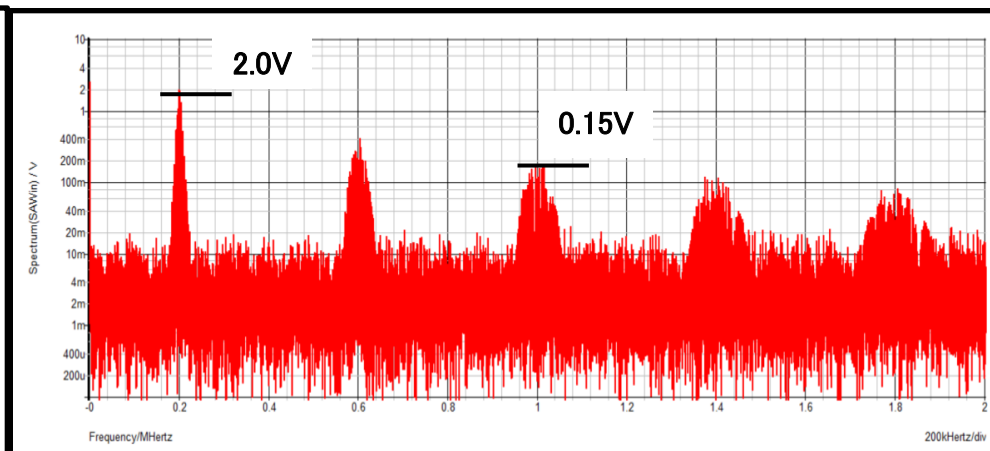


図9.16 スペクトラム拡散結果 (PLL変調)

9-5 新M系列信号発生回路(パターン長の拡大)

1) 原始多項式の併用

・式の切換え適用: $G(s) = x^3 + x^2 + 1$ 、 $G(s) = x^3 + x + 1$

2) ビット反転手法

・3ビット出力の反転 : 組合せ数 = 8

表9.1 原始多項式のビット反転パターン(3ビット)

原始多項式	$G(s) = x^3 + x^2 + 1$	$G(s) = x^3 + x + 1$
0) 反転無し	0-1-3-6-5-2-4-	0-1-2-5-3-6-4-
1) Q1 反転	1-0-2-7-4-3-5-	1-0-3-4-2-7-5-
2) Q2 反転	2-3-1-4-7-0-6-	2-3-0-7-1-4-6-
3) Q1Q2反転	3-2-0-5-6-1-7-	3-2-1-6-0-5-7-
4) Q3 反転	4-5-7-2-1-6-0-	4-5-6-1-7-2-0-
5) Q3Q1反転	5-4-6-3-0-7-1-	5-4-7-0-6-3-1-
6) Q2Q3反転	6-7-5-0-3-4-2-	6-7-4-3-5-0-2-
7) 全部反転	7-6-4-1-2-5-3-	7- 6-5-2-4-1-3-

3)ビット入替え手法:

・3ビット出力の入替え: 組合せ数 $N=6$

(a) $G(s) = x^3 + x^2 + 1 \Rightarrow$ 一部を示す

オリジナル $\Rightarrow$ (Q2Q1Q3) $\Rightarrow$ (Q1Q3Q2) $\Rightarrow$ (Q3Q2Q1)

反転出力	(0 1 3 6 5 2 4) $\Rightarrow$ 0 2 3 5 6 1 4 $\Rightarrow$ 0 1 5 6 3 4 2 $\Rightarrow$ 0 4 6 3 5 2 1
Q1	(1 0 2 7 4 3 5) $\Rightarrow$ 2 0 1 7 4 3 6 $\Rightarrow$ 1 0 4 7 2 5 3 $\Rightarrow$ 4 0 2 7 1 6 5
Q2	(2 3 1 4 7 0 6) $\Rightarrow$ 1 3 2 4 7 0 5 $\Rightarrow$ 4 5 1 2 7 0 6 $\Rightarrow$ 2 6 4 1 7 0 3
Q1・2	(3 2 0 5 6 1 7) $\Rightarrow$ 3 1 0 6 5 2 7 $\Rightarrow$ 5 4 0 3 6 1 7 $\Rightarrow$ 6 2 0 5 3 4 7
Q3	(4 5 7 2 1 6 0) $\Rightarrow$ 4 6 7 1 2 5 0 $\Rightarrow$ 2 3 7 4 1 6 0 $\Rightarrow$ 1 5 7 2 4 3 0
Q3・1	(5 4 6 3 0 7 1) $\Rightarrow$ 6 4 5 3 0 7 2 $\Rightarrow$ 3 2 6 5 0 7 1 $\Rightarrow$ 5 1 3 6 0 7 4
Q2・3	(6 7 5 0 3 4 2) $\Rightarrow$ 5 7 6 0 3 4 1 $\Rightarrow$ 6 7 3 0 5 2 4 $\Rightarrow$ 3 7 5 0 6 1 2
Q1・2・3	(7 6 4 1 2 5 0) $\Rightarrow$ 7 5 4 2 1 6 0 $\Rightarrow$ 7 6 2 1 4 3 0 $\Rightarrow$ 7 3 1 4 2 5 0

(b) $G(s) = x^3 + x + 1$

オリジナル $\Rightarrow$ (Q2Q1Q3) $\Rightarrow$ (Q1Q3Q2) $\Rightarrow$ (Q3Q2Q1)

反転出力	(0 1 2 5 3 6 4) $\Rightarrow$ 0 2 1 6 3 5 4 $\Rightarrow$ 0 1 4 3 5 6 2 $\Rightarrow$ 0 4 2 5 6 3 1
Q1	(1 0 3 4 2 7 5) $\Rightarrow$ 2 0 3 4 1 7 5 $\Rightarrow$ 2 3 6 1 7 4 0 $\Rightarrow$ 4 0 6 1 2 7 5
Q2	(2 3 0 7 1 4 6) $\Rightarrow$ 1 3 0 7 2 4 5 $\Rightarrow$ 4 5 0 7 1 2 6 $\Rightarrow$ 2 6 0 7 4 1 3
Q1・2	(3 2 1 6 0 5 7) $\Rightarrow$ 3 1 2 5 0 6 7 $\Rightarrow$ 5 4 1 6 0 3 7 $\Rightarrow$ 6 2 4 3 0 5 7
Q3	(4 5 6 1 7 2 0) $\Rightarrow$ 4 6 5 2 7 1 0 $\Rightarrow$ 2 3 6 1 7 4 0 $\Rightarrow$ 1 5 3 4 7 2 0
Q3・1	(5 4 7 0 6 3 1) $\Rightarrow$ 6 4 7 0 5 3 2 $\Rightarrow$ 3 2 7 0 6 5 1 $\Rightarrow$ 5 1 7 0 3 6 4
Q2・3	(6 7 4 3 5 0 2) $\Rightarrow$ 5 7 4 3 6 0 1 $\Rightarrow$ 6 7 2 5 3 0 4 $\Rightarrow$ 3 7 1 6 5 0 2
Q1・2・3	(7 6 5 2 4 1 3) $\Rightarrow$ 7 5 6 1 4 2 3 $\Rightarrow$ 7 6 3 4 2 1 5 $\Rightarrow$ 7 3 5 2 1 4 6

★3ビットの場合：基本的な配列組合せ

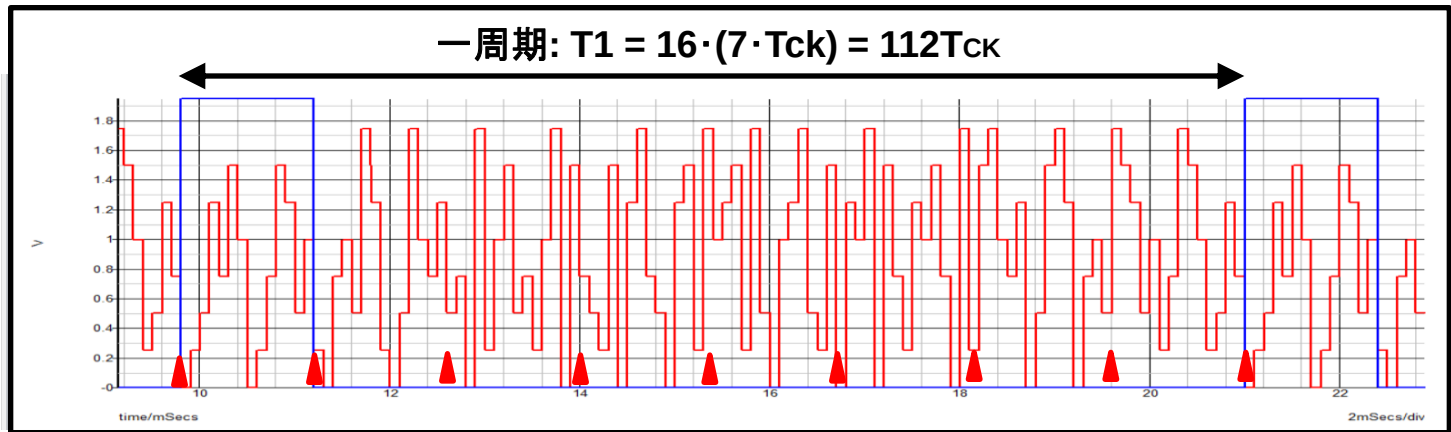
$N = {}_7P_7 = 7! = 5,040$ 通り (基準 = 0 とする)

$\Rightarrow$ 上記手法では、このうちの 112通りのみ

$\Rightarrow$ もっと長い周期長があるはず！ $\longleftrightarrow$ 4ビットと比較して効果はどうか？

●新M系列回路 出力ビット波形

a)ビット反転手法(×8)



b)ビット反転＋入替え手法(×8・6)

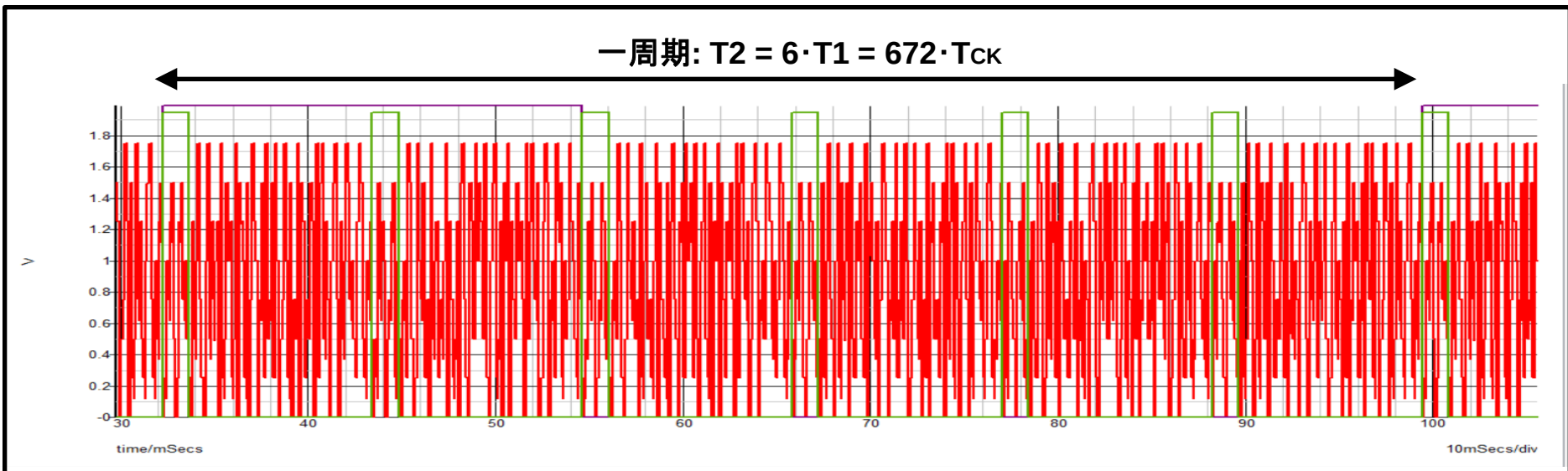


図9.17 新M系列回路によ出力パターン

●新M系列信号発生回路によるスペクトラム拡散

★スペクトラム拡散結果

・基本周波数(200 kHz)

[測定周期:100ms]

a) 無変調: 3.2 V

b) 基本: 1.7 V (−2.7 dB)

c) 反転:

d) 入替:

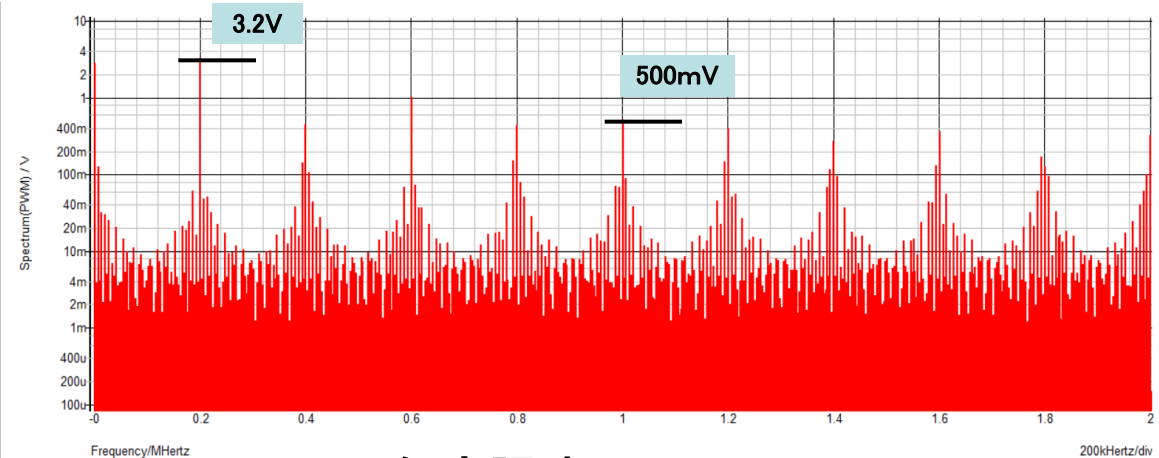
・5倍高調波(1.0 MHz)

a) 無変調: 500 mV

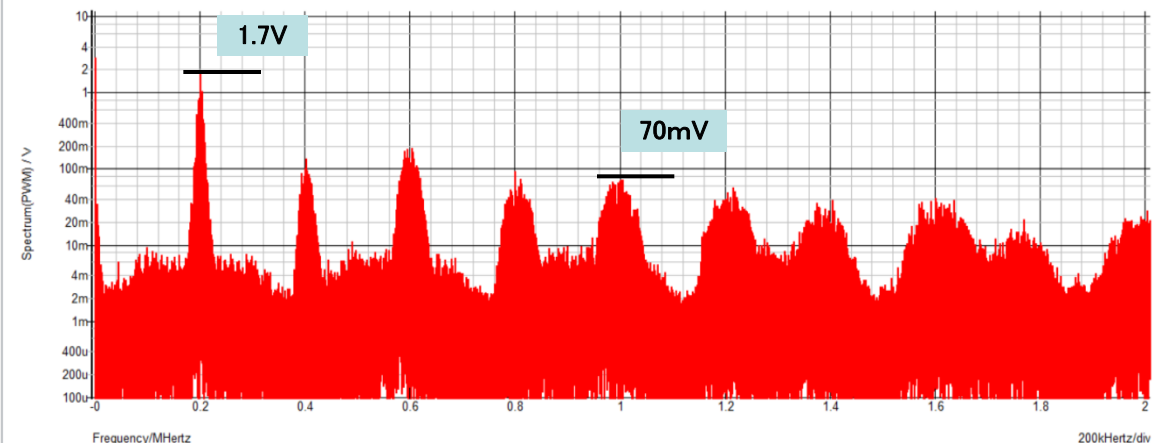
b) 基本: 70 mV (−8.5 dB)

c) 反転:

d) 入替:



(a) 無変調時のスペクトラム拡散



(b) 基本変調によるスペクトラム拡散

図9.18 新M系列回路によるスペクトラム拡散

●新M系列信号発生回路によるスペクトラム拡散

★スペクトラム拡散結果

・基本周波数(200 kHz)

[測定周期:100ms]

a) 無変調: 3.2 V

b) 基本: 1.7 V (−2.7 dB)

c) 反転: 1.3 V (−3.9 dB)

d) 入替: 1.1 V (−4.6 dB)

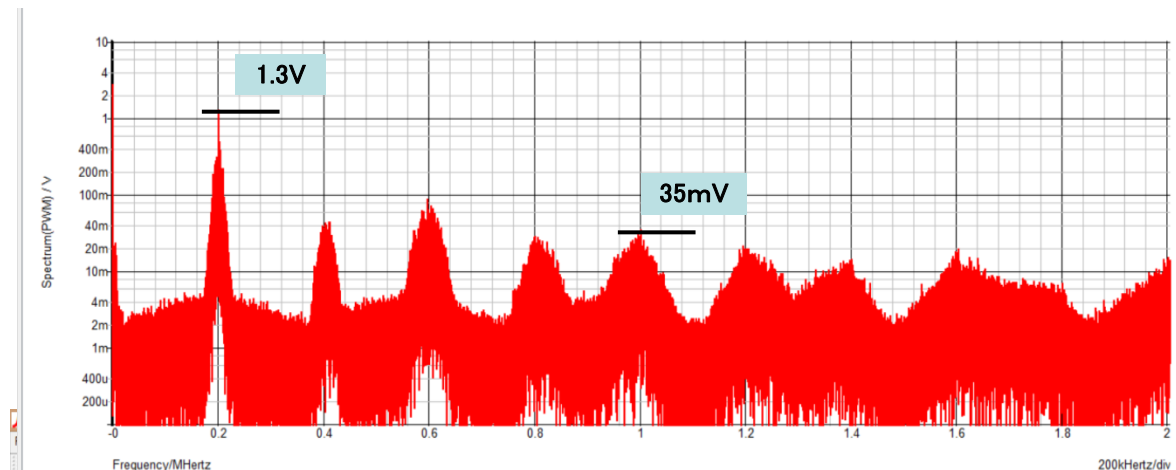
・5倍高調波(1.0 MHz)

a) 無変調: 500 mV

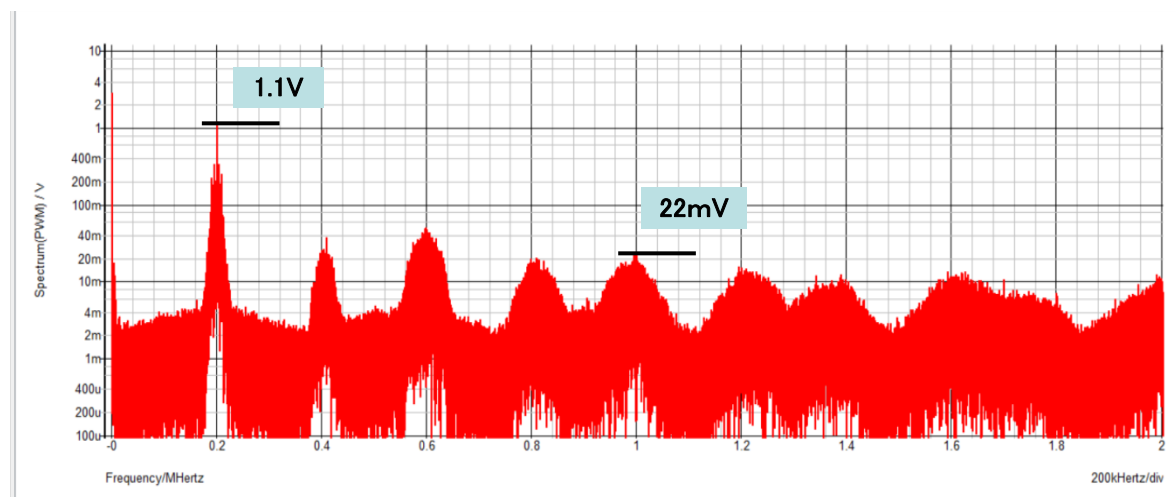
b) 基本: 70 mV(− 8.5 dB)

c) 反転: 35 mV(−11.5 dB)

d) 入替: 22 mV(−13.6 dB)



(c) ビット反転によるスペクトラム拡散



(d) ビット反転＋入替えによるスペクトラム拡散

図9.19 新M系列回路によるスペクトラム拡散

★ 出力電圧リップルの確認

- ・出力リップル: 13mVpp (@ビット反転+入替え)
- ・周期性: 20ms内では周期性無し(類似波形有り)

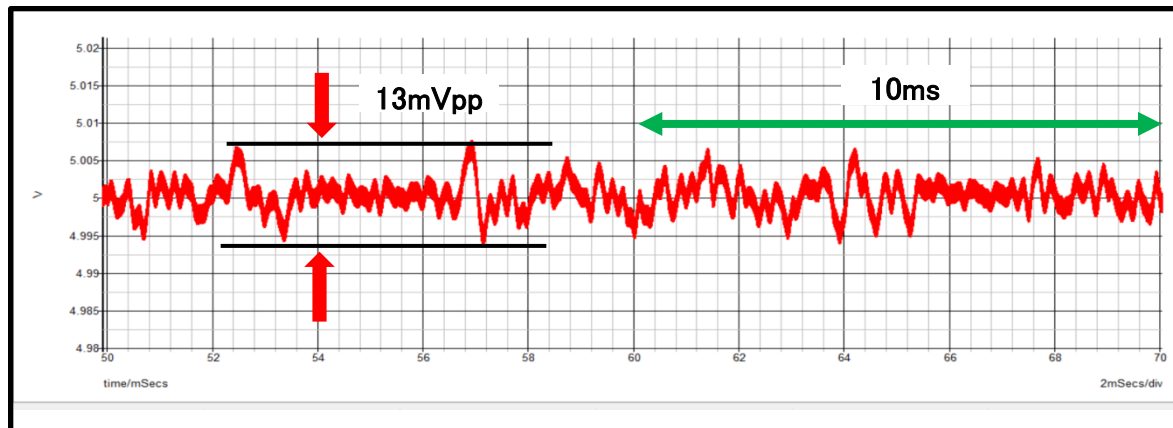


図9.20 新M系列回路使用時の出力リップル

● 多ビット化

- ・4次原始多項式(例): a) $G(s) = x^4 + x^3 + 1$ 、 b) $G(s) = x^4 + x + 1$

a) 0 1 3 7 14 13 11 6 12 9 2 5 10 4 8

b) 0 1 2 5 10 4 9 3 6 13 11 7 14 12 8 ...各 15パターン長

- ・周期長の拡大(1つの原始多項式につき):

*ビット反転×ビット入替え = $2^4 \times {}_4P_4 = 16 \times 24 = 384 \Rightarrow 5,760$ パターン長

以上