

論 文

ショット雑音で周波数変調した LC 発振回路による物理乱数の生成

齊藤 義明^{†a)} 堀 潤一[†] 木竜 徹^{††}Generation of Physical Random Number Using Frequency Modulated
LC Oscillation Circuit with Shot NoiseYoshiaki SAITOH^{†a)}, Junichi HORI[†], and Tohru KIRYU^{††}

あらまし 筆者らは先に、周期性のない一様乱数を発生する物理乱数発生法として「可変容量パラメトロンによる物理的乱数発生法」を発表した。一般の発振器でも発振周波数を不安定にすれば乱数を発生できると考えられる。不安定にする方法として LC 発振回路をショット雑音で周波数変調することを考えた。本論文では、実際にショット雑音を印加した LC 発振回路で実験を行い、生成された数字列について暗号用乱数としての統計的乱数性 (FIPS140-2) の評価を行い、乱数の発生が可能であることを示した。

キーワード 物理乱数, 発振回路, ショット雑音, 周波数変調, 暗号用乱数

1. ま え が き

乱数は、社会現象や物理現象の数値シミュレーションや情報保護のための暗号化技術として重要な役割を担っているため、周期性のない一様乱数を発生する乱数発生法が切望されている [1]~[9]。筆者らは先に、「可変容量パラメトロンによる物理的乱数発生法」を発表した [10]。この方法では、発振の位相は発振の立上り時点で回路に存在していた雑音に依存する性質を利用して [11]~[13]。この考えを推し進めると、一般の発振器の発振立上りの振幅や位相も回路に存在している雑音に依存しているため、それを利用して乱数を発生できると考えられる。更に、考えを発展させると発振周波数が不規則的に不安定であればその振幅を用いて乱数を発生できることが推測される。

上述の考えを実証するため、実際にショット雑音で周波数変調をかけた LC 発振回路を組み実験し、生成された数字列の統計的性質を調べ、評価を行い乱数の発生が可能であることを示す。本論文では、暗号用乱数の生成を目的とするため、暗号用乱数の統計的乱数性を評価

する方法として有名な NIST の FIPS140-2 [14], [15] を評価尺度として用いる。

乱数を生成する方法として、発振回路やショット雑音の出力を直接計算機に取り込み、数値化する方法も考えられる。そこで、発振回路単独の場合、ショット雑音発生回路単独の場合、更にショット雑音発生回路からの出力で周波数変調をかけた発振回路の場合について、暗号用乱数の生成が可能であるか否か、及び乱数生成速度がどのようになるかについて検討する。

提案する装置は、従来の他の方法 [1]~[9] と比較して必ずしも高速ではない。本論文では、乱数生成装置の新しい原理的提案をすることに主眼をおいている。ただ、発振回路は数十 GHz まで動作可能であるから、A-D 変換器を含めたハードウェアのスピードが対応できれば、筆者らの方法は高速化できる可能性はある。

2. 乱数生成の基本原理解

LC 発振回路の発振周波数は発振回路を構成する L, C の値によって決定される。もし、L または C の値を変調信号で変化させれば周波数変調をかけることができる。本論文の場合、一般の通信の場合と異なるのは、変調信号が情報の担い手ではなくて、ショット雑音のような電圧を用いることである。このことを定式化し、簡略化した式で表すと以下のようなになる。

$$V_o = \sin(\omega_c t + kC(V_n)) \quad (1)$$

[†] 新潟大学工学部福祉人間工学科, 新潟市
Dept. of Bio-Cybernetics, Niigata University, 8050 Ikarashi
2-nocho, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††} 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
8050 Ikarashi 2-nocho, Niigata-shi, 950-2181 Japan

a) E-mail: saito@bc.niigata-u.ac.jp

ここで、 V_o は出力電圧、 ω_c は高周波角周波数、 t は時間、 k は変調係数、 V_n は各時刻の雑音電圧であり、 $C(V_n)$ は V_n の関数で可変容量ダイオードの各時刻の値である。変調係数 k は一般の通信の場合は変調指数と呼ばれるものに相当するが、ショット雑音には周期がないので別の言い方をすることにする。 V_o を A-D 変換して 2 進数を作れば乱数を生成することができる。

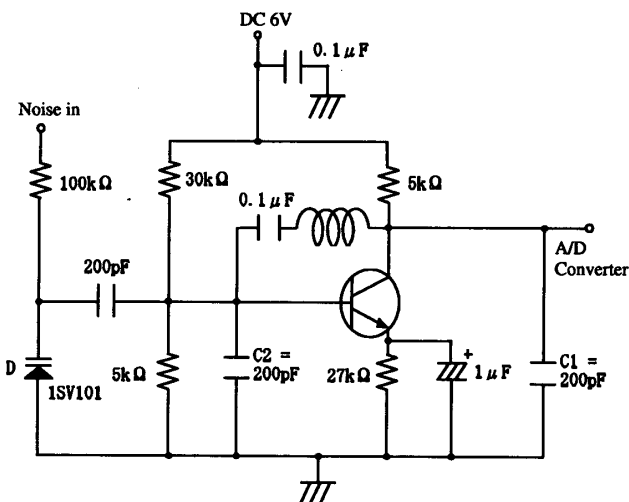


図 1 LC 発振回路

Fig. 1 LC oscillation circuit.

3. 乱数生成システム

実際に実験に用いたコルピッツ LC 発振回路を図 1 に、ショット雑音発生回路を図 2 に示す。周波数変調は図 1 に示す可変容量ダイオード D に図 2 のショット雑音発生回路からの出力電圧を加えて行っている。

3.1 発振回路による乱数生成

図 1 のコルピッツ LC 発振回路を用いて乱数を生成する。周波数変調をかけない場合の発振周波数は約 3.42 MHz である。乱数採取は発振回路を発振させた後、A-D 変換を行い計算機にデータを取り込む。

3.2 雑音発生回路による乱数生成

乱数を生成する方法として、雑音を直接取り込み、数値化する方法も考えられる。雑音を発生させる方法の中で、本論文ではダイオードのショット雑音に注目する。ショット雑音は、ダイオードの接合部を流れるキャリアの粒子性とその不規則性に起因するドリフトに基づく雑音電流である。図 2 ではダイオードで発生したショット雑音を約 102 dB の電圧利得で増幅し、+1.75 V のオフセット電圧を加えることで、雑音振幅を 0.8~2.7 V 程度に調節している。この出力に対して A-D 変換を行い計算機にデータを取り込む。

3.3 発振回路と雑音発生回路による乱数生成

乱数を高速で発生させるためには、A-D 変換器のサンプリング周波数をなるべく高く設定する必要がある。しかしながら、発振回路単独あるいは、乱数生成回路単独では高いサンプリング周波数に設定すると、検定を通過する割合が低下すると考えられる。

まず、変調をかけない発振回路単独の場合のサンプリング周波数と検定通過率の関係を図 3 に示す。乱数を得る方法については、後述の 3.4 で述べる方法を用いた。ここで、検定とは FIPS140-2 による暗号的な乱数検定を指し、検定通過率とは 20,000 ビットデータを 1 組とし、100 組に対して FIPS140-2 の検定を通過した割合とする。検定法の詳細は 4. で示す。図 3 からサンプリング周波数が 50 Hz くらいから検定通過率が低下することが分かる。

次に、ショット雑音発生回路単独の場合のサンプリング周波数と検定通過率の関係を図 4 に示す。乱数を得る方法は、3.4 で述べる方法を用いた。図 4 からサンプリング周波数が 1 kHz くらいから検定通過率が低下することが分かる。このように、変調をかけない発振回路単独あるいはショット雑音発生回路単独の場合には検定を通過するサンプリング周波数を高くできない。

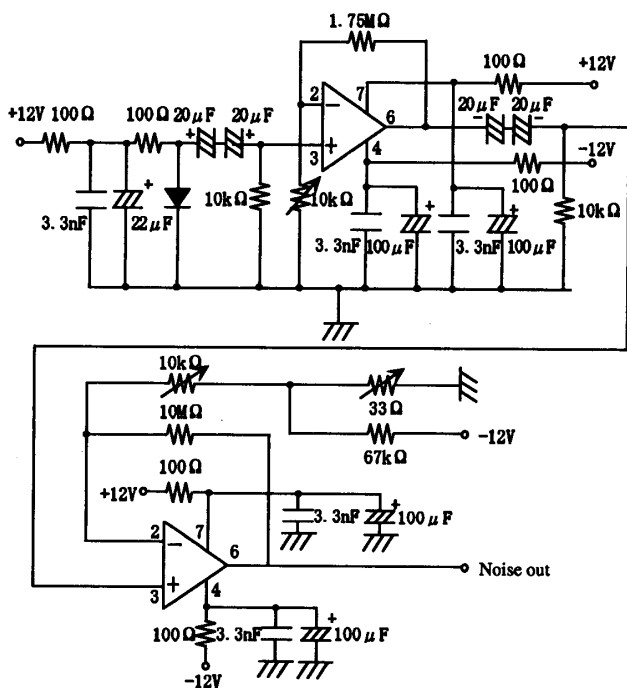


図 2 ショット雑音発生回路

Fig. 2 Shot noise generator.

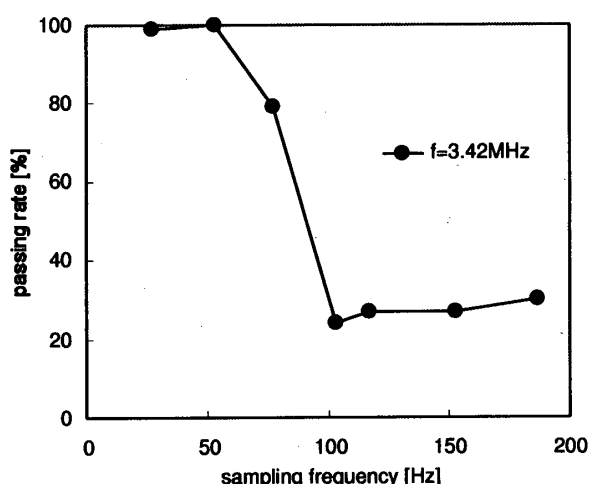


図3 LC発振回路単独の場合の検定通過率
Fig. 3 Passing rates of random number test in the case of an LC oscillation circuit alone.

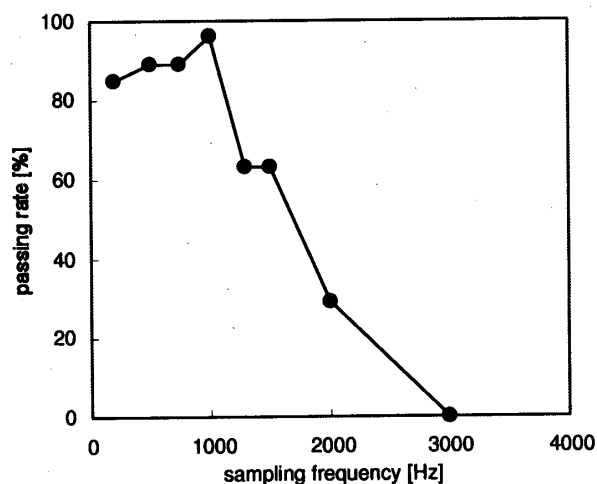


図4 ショット雑音発生回路の場合の検定通過率
Fig. 4 Passing rates of random number test in the case of a shot noise generator alone.

すなわち、乱数生成速度が遅いことになる。そこで、二つの乱数生成方法を組み合わせることにより、サンプリング周波数が高い状態で検定通過率を増加させることを考える。

図5に二つを組み合わせた乱数生成法を示す。発振出力を、A-D変換器（Contec AD12-16A）を介してデジタル化し、パーソナルコンピュータ（日本電気PC9821Xa）に取り込む。コンピュータ上で、取り込まれたデータから乱数の数値を生成して、出力する。

発振周波数、サンプリング周波数が、互いに無理数の比にならない限り、取得データに周期性が出る可能性がある。そこで、本研究ではA-D変換のタイミングは発振回路とは非同期とし、互いに周波数が無理数の比となるように設定した。

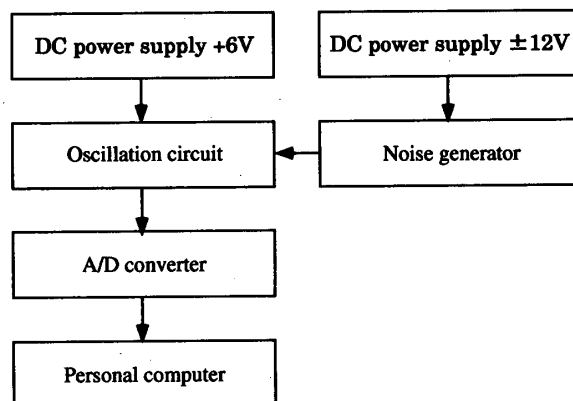


図5 LC発振回路と雑音発生回路による乱数生成
Fig. 5 Random number generation with the LC oscillation circuit and the noise generator.

3.4 乱数データ生成法

A-D変換器で取得したデータから乱数を生成する方法を説明する。発振器出力回路にコンデンサを入れてないので、A-D変換器に取り込む信号には約2Vの直流電圧が平均値として存在する。オシロスコープでこの電圧を測定し、最初のしきい値として設定する。今、固定区間長 N における0及び1の出現確率をそれぞれ「0の出現数/ N 」及び「1の出現数/ N 」とする。統計学的乱数検定法の一つであるモノビットテストでは、0または1の出現確率が0.48625以上0.51375以下にしなければならない[15]。ところが、この発振器出力は完全な正弦波ではないので、モノビットテストを通過しない可能性がある。もし1が多い場合はしきい値を高くし、0が多い場合はしきい値を低くする。しきい値レベルを変化させた場合のモノビットテストの通過率を実測した例を図6に示す。ここで、通過率とは、20,000ビットを1組として、100組のデータに対してモノビットテストを通過した割合を示す。A-D変換器の最小分解能は5mVであり、しきい値を2.170Vに設定すると100%合格した。このしきい値は一度設定すれば経時的な変更は必要なく、またサンプリング周波数の変更に対してもしきい値を変える必要はない。

このように設定したしきい値を用い、A-D変換器から取り込まれた10進データがしきい値以下であれば0に、しきい値を超えれば1に変換する。すべてのデータを記録し、2進データを取得する。LC発振回路単独の場合、及びショット雑音発生回路単独の場合も同様の手順で2進データを取得した。

出現確率を算出する際の区間長を長く設定すると、検定に時間がかかるとともに、使用できないデータが

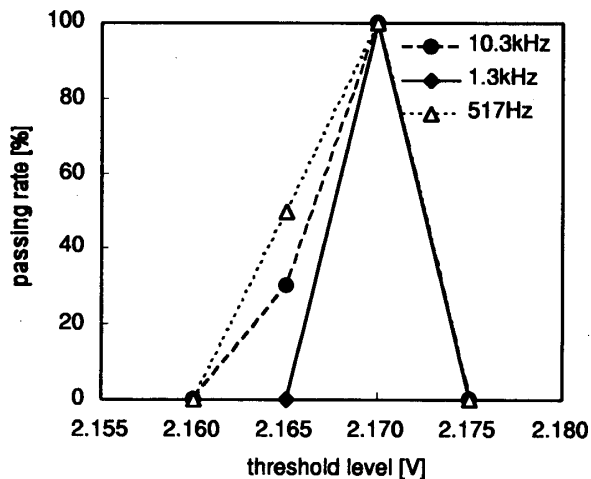


図 6 しきい値レベルを変化させた場合のモノビットテスト通過率

Fig. 6 Relationship between the passing rate of the monobit test and the threshold level.

多くなるため、乱数生成速度が低下する。一方、区間長を短く設定すると、その区間長による周期性が出現する可能性もある。本研究では、暗号用乱数の検定を行うため、FIPS140-2 の統計的乱数検定の条件から区間長を 20,000 ビットに設定する。

4. 乱数の評価

暗号用乱数として使用するためには、暗号学的強度評価を行う必要がある。暗号学的に安全な乱数かを評価する条件として、統計的乱数性、長周期性、非線形性、無相関性、線形複雑度が大きいことなどが挙げられる。この中で、統計的乱数性は、統計的な意味で乱数とみなせるか否かの評価であり、本論文では、この統計的乱数性について評価する。統計的乱数性の評価法として、NIST (National Institute of Standards and Technology) の FIPS140-2 を採用する [15]。以下に、FIPS140-2 の統計的乱数検定の内容を示す。

生成された長さ 20,000 ビット系列は次の四つのテストをすべてパスしなければならない。

4.1 モノビットテスト

系列中の 1 の個数 X は $9,725 < X < 10,275$ を満たす。

4.2 ポーカーテスト

系列を 4 ビットずつ分割して 5,000 個のブロックに分ける。ブロック内の 4 ビットを 16 進数としたときの値が i となるブロックの個数を $f(i)$ とする ($0 \leq i \leq 15$)。このとき $f(i)$ は

表 1 ランの分布

Table 1 The distribution of run.

ランの長さ	要求される個数検定
1	2,315~2,685
2	1,114~1,386
3	527~723
4	240~384
5	103~209
6 以上	103~209

$$2.16 < \frac{16}{5000} \sum_{i=0}^{15} f(i)^2 - 5000 < 46.17 \quad (2)$$

を満たす。

4.3 ランテスト

0 のラン及び 1 のランの分布が表 1 の条件を満たす。

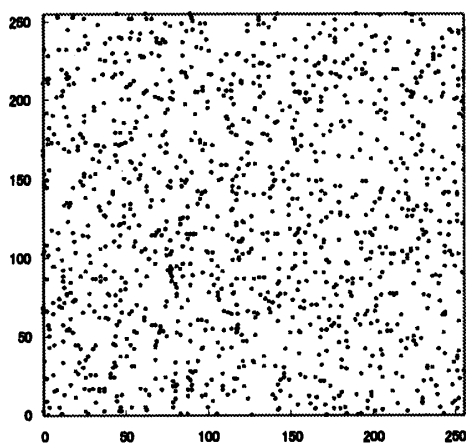
4.4 長ランテスト

26 ビット以上のランを含まない。

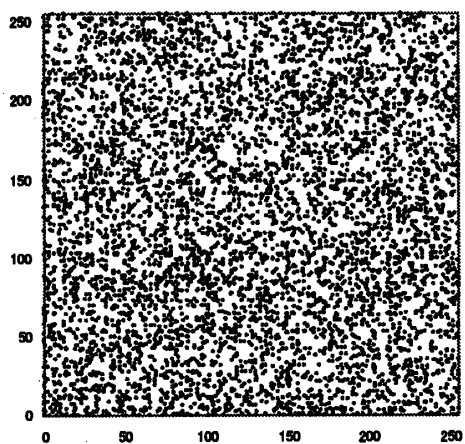
5. 検定結果

まず、2次元度数分布の結果を示す。図 5 の乱数生成法を用いて、出力した 20,000 ビットの 2 進データから 2,500 個の 8 ビット数値データを作成し、先頭から 2 個ずつ 1 組にし、 $(x_i, y_i), i = 1, \dots, 1,250$ とおく。これら各組を 2次元平面上の x 座標、 y 座標とみなし、平面上にプロットすることで、1,250 個の座標点による 2次元度数分布を作成し、データの一様性を視覚的に判断した。図 7(a) に、20,000 ビットのデータを用いて作成した 2次元度数分布の一例を示す。発振器の中心周波数は約 3.42 MHz で、A-D 変換のサンプリング周波数は約 1 kHz とした。図 7(b) は、80,000 ビットのデータを追加して 100,000 ビットを表示したもの、図 7(c) は更に 100,000 ビットを追加して合計 200,000 ビットを表示したものである。これらの図から、生成されたデータが 2次元空間座標上に一様にプロットされていることが確認できる。

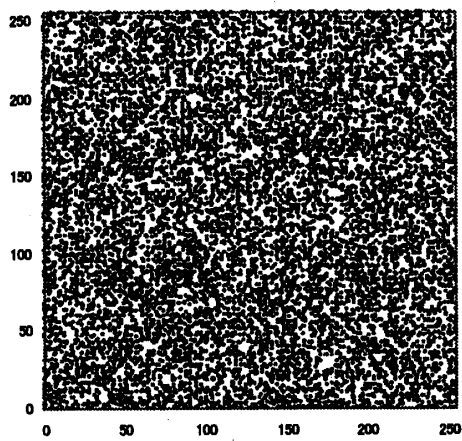
次に、しきい値を設定した後で採取した 20,000 ビットを 1 組として、100 組のデータに対しモノビットテストを実施した。図 8(a) に、発振周波数が約 3.42 MHz の場合のモノビットテスト通過率を示す。グラフ上「▲印」が付いているサンプリング周波数の異なる各点に対して 100 組のデータを採取した。高いサンプリング周波数までほぼ 100% 近い通過率を示している。また、FIPS140-2 による検定結果も同図に示す。他の 3 組のテスト (ポーカーテスト、ランテスト、長ランテスト) も含めすべてのテストを通過したデータの組「○印」



(a) 20,000 bits

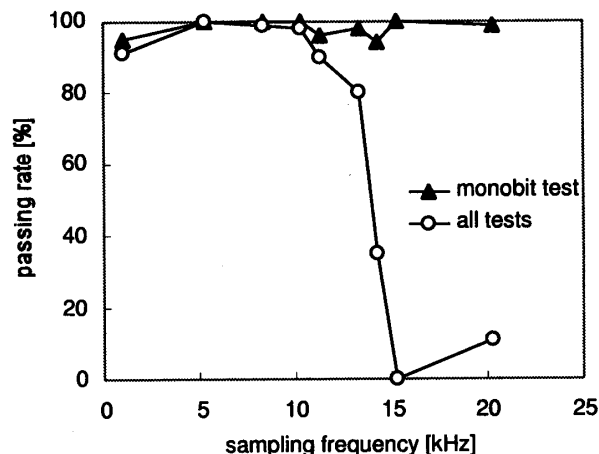


(b) 100,000 bits

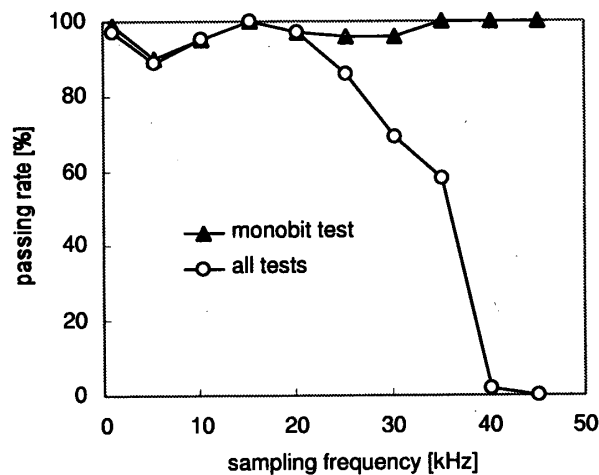


(c) 200,000 bits

図 7 生成乱数データの 2 次元度数分布 (発振周波数 3.42 MHz, サンプル周波数約 1 kHz の場合)
 Fig. 7 Two dimensional frequency distribution of the random number data generated by the proposed method. Oscillation frequency = 3.42 MHz, Sampling frequency = 1 kHz.



(a) $f=3.42\text{MHz}$



(b) $f=3.90\text{MHz}$

図 8 モノビットテスト通過率と全検定通過率
 (a) 発振周波数 3.42 MHz の場合, (b) 発振周波数 3.90 MHz の場合
 Fig. 8 Passing rates of the monobit test and all tests.
 (a) Oscillation frequency = 3.42 MHz. (b) Oscillation frequency = 3.90 MHz.

は、サンプリング周波数の上昇とともに急激に低下している。100%近い検定通過率を得るためには、3.3で述べたごとく発振回路（発振周波数約 3.42 MHz）単独では 50 Hz、ショット雑音発生回路単独では 1 kHz までしかサンプリング周波数を上げられないのに対し、その二つの回路を組み合わせることによって図 8(a) のように約 10 kHz までサンプリング周波数を上げることができた。更に、コンデンサ C の値を 200 pF から 100 pF に変更し、発振周波数を約 3.90 MHz にすると、図 8(b) のようにサンプリング周波数を約 25 kHz まで上げることができた。

図 9 にサンプリング周波数とデータ生成速度 [bits/s]

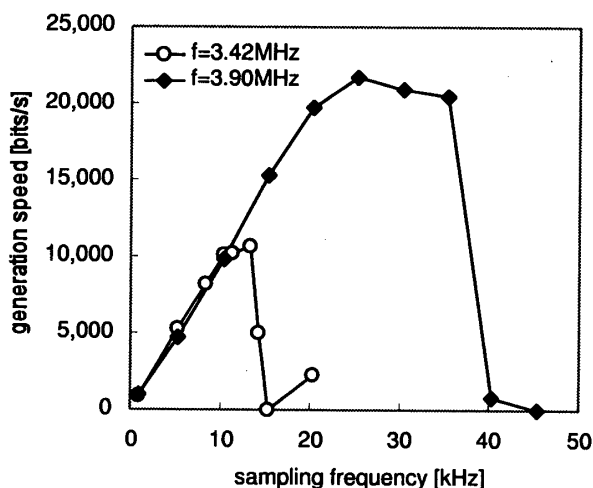


図 9 乱数データ生成速度

Fig. 9 Generation speed of the random number data.

の関係を示す。ここで、データ生成速度とは、1秒間に生成できる乱数データ数を表し、サンプリング周波数と検定通過率とを乗算することにより算出した。図9の結果は、図8(a), (b)のデータより算出したものである。今回の実験の条件では、発振周波数が3.42 MHzのとき約13 kHzに、3.90 MHzのとき約25 kHzにピークが存在する。

6. 考 察

本論文では、ショット雑音で周波数変調をかけた LC 発振回路というシンプルな構成で周期性のない様な物理乱数を生成できる装置の可能性を示した。発振回路単独、あるいはショット雑音発生回路単独の場合に比べて、ショット雑音で周波数変調をかけた約3.42 MHzの LC 発振回路ではサンプリング周波数を無変調の場合の約10倍の約10 kHzまで高くすることができることを確認した。更に、発振周波数を約3.90 MHzと高くするとサンプリング周波数を約25 kHzと高くすることができることも確認できた。しかし、乱数発生器の性能は検定通過率だけで評価されるものではなく、検定通過率にサンプリング周波数をかけた1秒間当りに生成できる乱数の個数として評価すべきである。つまり、乱数生成に最適なサンプリング周波数は、図9に示したように乱数生成速度を考慮して決定する必要がある。

3.4のしきい値設定方法は、瞬時の発振出力が発振出力の平均値を超えたら1、それ以下なら0と判定していることになる。もし、発振出力の平均値が0Vの場合であれば瞬時信号が正か負(0を含む)かの判定

をしていることと等価である。今回は使用した A-D 変換器が正の値しか取り扱えない性能のため直流を重畳させたが、正負の値を取り扱える性能をもつ A-D 変換器を使えば、直流を除去した発振出力に対して正か負(0を含む)かの判定を行うことができる。この場合は10進化する必要はない。

ショット雑音を印加することで、どのくらい発振周波数が変化するかについて考える。可変容量ダイオード 1SV101 のデータ図から代表値として逆電圧 2.5 V のとき $C_v = 31.8$ pF, 同 1.75 V のとき $C_v = 38.2$ pF, 同 0.8 V のとき $C_v = 45.3$ pF と読み取れる。可変容量ダイオードには 1.75 V のバイアス電圧をかけ、 ± 0.95 V の雑音電圧を加えている。 $C_2 = 200$ pF の場合の周波数の実測値は $V_c = 1.75$ V のとき $f_{1.75} = 3.422$ MHz, $V_c = 2.7$ V のとき $f_{2.7} = 3.438$ MHz である。周波数の変化比は $f_{2.7}/f_{1.75} = 1.00467$ である。一方、コルピッツ発振回路としての計算値は 1.00477 となる。これらのことより、約 0.47% の周波数変化があることが分かる。 $C_2 = 100$ pF の場合、同様の測定及び計算をすると周波数変化は約 1% である。発振周波数を高くすると周波数変化は大きくなり、サンプリング周波数を高くできるので、本方法にとっては好都合である。

本方法は、従来の他の方法 [1]~[9] と比較して必ずしも高速ではない。そこで、本装置における乱数生成速度についてハードウェアとソフトウェアの両面から考察を行う。本研究における乱数生成システムでは、周波数が不安定になる波を短時間に数多く発生させることで、より高いサンプリング周波数でデータを取得できる。よって発振周波数を高くすることで、乱数生成速度を向上させることができると考えられる。すなわち、サンプリング周波数が f_s の場合、乱数発生装置が n 個の 8 ビット数値データを生成するまでにかかる時間を T とすると、 $T = n \times 8 / f_s$ で与えられる。この式より、サンプリング周波数を高めれば、高速に数値データを取得できることが分かる。しかし、サンプリング周波数が A-D 変換器への入力信号の周波数に比べて高い場合、乱数発生装置で生成されるデータは乱数とみなせなくなる。つまり、一定のサンプリング周波数でサンプリングし、しきい値の境界で、0, 1 を振り分けるものとする、サンプリング周波数が入力信号の周波数に比べて高い場合には信号の同じ側を連続的にサンプリングすることになる。この場合一定の数値データが連続して出力されるため、データを乱数と認めることができなくなる。乱数データを出力す

るためには、サンプリング周波数を入力信号の周波数より低く設定しなければならないことになる。以上より、乱数発生装置を高速化するには、A-D変換器への入力信号の周波数を高くする必要がある。ここで、コンデンサCまたはコイルLの値を小さくすることで、発振周波数の値を高くすることができるので、より高いサンプリング周波数によるデータ取得が期待できる。実際にCの値を200 pFから100 pFに変更することでサンプリング周波数を約2.5倍にすることができた。発振回路は数十GHzまで動作可能であるから、A-D変換器を含めたハードウェアのスピードが対応できれば、本方法は非常に高速化できる可能性がある。

高速化の他の方法は、変調係数 k を大きくすることである。無変調時の発振周波数が同じでも変調係数 k が大きくなれば発振周波数の変化幅が広くなり、不安定性が増大する可能性がある。または、ショット雑音発生回路の帯域幅を広げ、 k の時々刻々の変化を増大させる工夫も考えられる。今後、これらのことについても実験していきたい。

乱数を生成するにあたって、固定区間長における出現確率を判定し、データの使用を行った。本論文では、FIPS140-2の統計的乱数検定の条件より区間長 $N = 20,000$ に設定した結果、生成されたデータは各種乱数検定を通過した。本研究では全取得電圧データを2進数に変換し、ある区間内で0と1の出現確率が0.48625以上0.51375以下にならなかった場合、その区間内のデータを使用しない。使用しないデータの数を少なくすることによって乱数発生装置を高速化できる。このためには、雑音発生回路以外に由来する不安定性、例えばトランジスタのドリフト、電源電圧や室温の変化、外来雑音等を減らすことが考えられる。特に、振幅に変化をもたらす不安定要素を排除することが重要である。

7. むすび

ショット雑音で周波数変調をかけたLC発振回路から出力された発振信号を用いて、2進数データを生成した。この生成データに対して、2次元度数分布とFIPS140-2の統計学的検定法を用い、データの暗号用乱数としての精度を検証した。実験の結果、LC発振回路単独の場合、またはショット雑音発生回路単独の場合に比べて、乱数生成速度が格段に向上し、発振周波数を高くすることで、更に生成速度が改善された。上述のような簡単なシステムで乱数が発生できる意義

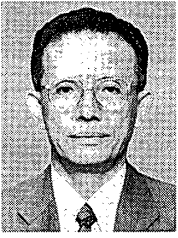
は大きいと考えている。今後の課題として、乱数生成速度の更なる高速化、また、パーソナルコンピュータ内部に組み込めるようシステムの小型化が挙げられる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、実験を実施した前川治子君に謝意を表す。

文 献

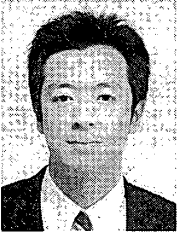
- [1] 宮武 修, 脇本和昌, 乱数とモンテカルロ法, 森北出版, 1978.
- [2] D.E. Knuth, (渋谷政昭訳), 準数値算法/乱数, サイエンス社, 1981.
- [3] 伏見正則, 乱数, 東京大学出版会, 1989.
- [4] 石田正次, “放射能のランダム性について,” 統計数理研究所彙報, vol.4, no.2, pp.31-33, 1956.
- [5] O. Minatare, H. Inoue, and Y. Yoshizawa, “Generation of physical random number,” Math. Jap., vol.20, pp.207-217, 1975.
- [6] 仁木直人, “工学的乱数発生,” 統計数理研究所彙報, vol.27, no.1, pp.115-131, 1980.
- [7] 仁木直人, “パーソナルコンピュータのための物理乱数発生装置,” 統計数理研究所彙報, vol.31, no.1, pp.33-49, 1983.
- [8] 岸本俊祐, 福江万寿夫, “ダイオードノイズを利用した物理乱数の発生とその評価,” 信学論 (A), vol.J82-A, no.11, pp.1704-1709, Nov. 1999.
- [9] 脇本和昌, 乱数の知識, 森北出版, 1970.
- [10] 斉藤義明, 堀 潤一, 西村浩志, 木竜 徹, “可変容量パラメトロンによる物理的乱数発生法,” 信学論 (A), vol.J85-A, no.2, pp.181-188, Feb. 2002.
- [11] 後藤英一, “非線型共振子のパラメータ励振とその応用,” 信学誌, vol.38, no.10, pp.770-775, Oct. 1955.
- [12] 高橋秀俊, “パラメトロンについて,” 信学誌, vol.39, no.6, pp.586-590, June 1956.
- [13] H. Takahashi, “Information theory of quantum-mechanical channels,” Advanced in Communication Systems, vol.1, pp.227-310, Academic Press, New York, 1965.
- [14] 岡本栄司, 暗号理論入門 第2版, 共立出版, 2002.
- [15] National Institute of Standards and Technology, “Security requirements for cryptographic modules,” FIPS 140-2, 2001.
- [16] 黒部貞一, 品田雄治, 斉藤義明, 大学課程電子回路 (1), オーム社, 1980.

(平成15年12月10日受付, 16年3月8日再受付,
3月25日最終原稿受付)



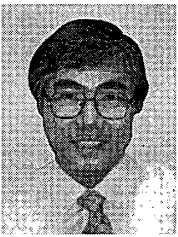
斉藤 義明 (正員)

1965 北海道大学大学院工学研究科修士課程了。1970 工博。1965 から新潟大学工学部勤務，現在同学部福祉人間工学科教授。生体情報，医療情報の収集，解析装置，治療装置の開発研究に従事。IEEE シニアメンバー，日本エム・イー学会，日本ハイパーサーミア学会，情報処理学会各会員。



堀 潤一 (正員)

1986 新潟大・工卒。1988 同大学院工学研究科修士課程了。同年新潟大学工学部助手。現在，同大学工学部福祉人間工学科助教授。博士(工学)。1999～2000 イリノイ大学シカゴ校客員研究員。高精度生体計測，生体信号・医療画像の復元，脳機能解析と逆問題の研究に従事。IEEE，日本エム・イー学会，日本ハイパーサーミア学会，日本生活支援工学会各会員。



木竜 徹 (正員)

昭 50 新潟大・工・電子卒。昭 52 同大学院修士課程了。昭 61 同大助教授，平 7 同大学院教授，平 8 筑波大学 TARA センター客員研究員，現在に至る。工博。非定常生体信号処理を目的とし，非定常性の特徴分類，時変性パラメータ推定等研究に従事。最近では，動的筋活動の解析を進めている。日本エム・イー学会評議員，バイオメカニズム学会，IEEE 各会員。