

近接電場作用およびCDMA通信方式に基づく 無線シナプス/ニューロデバイス

金澤 雄亮 山田 崇史 浅井 哲也 雨宮 好仁

北海道大学工学部 電子工学科
〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

E-mail: {kanazawa,yamada,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

あらまし ニューラルネットを集積回路化する際、結合の配線部が占める面積が大きな問題になる。この問題を解決するために、本稿では以下の二つの方法: (1) ニューロン間の信号伝達を多重通信方式を使って実現する方法; (2) 電場を発するニューロンと微小アンテナデバイスを利用する方法、を提案する。(1)では、1チップ上に一つのニューロンと無線通信回路およびシナプス回路を実装する。これらのチップを無線通信方式を用いて結合する。ここでは例として、 N 個のニューロンに対する結合数が $O(N^2)$ となる相互結合ネットワークを構成し、その動作シミュレーション結果について示す。一方(2)では、1チップ上に多数のニューロンを集積し、それぞれのニューロンが電場を発生/検知して信号を伝達する。簡単な例として、 N 個のニューロンに対する結合数が $O(N)$ となる系の構成案を示す。

キーワード CDMA, 集積回路, ニューラルネットワーク, 半導体デバイス

Wireless Synaptic / Neuro Devices based on Interactions of Local Electric-Fields and CDMA Communication Technology

Yusuke KANAZAWA, Takashi YAMADA, Tetsuya ASAI, and Yoshihito AMEMIYA

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628, Japan

E-mail: {kanazawa,yamada,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

Abstract In this report, we propose a novel LSI architecture that allows silicon LSIs to implement large-scale neural networks; i) neural networks consisting of a number of neuro chips (neurons) that use CDMA protocols to communicate with the other neurons, ii) neural networks on single neuro chip that consists of a number of neuro devices with a micro-antenna device. As an example of i), we propose a CDMA-Hopfield neural network, aiming at examining possible effects on retrieval properties of the network. Extensive simulation results indicated that the Hopfield network of N neurons could retrieve signal patterns from P memory patterns when $P/N \approx 0.1$. Furthermore, a wireless synaptic device based on local interactions of electrostatic fields is also introduced as an example of ii). We present simulation results of the synaptic device with basic neuron circuits, which indicates that the wireless device (chip) can be developed by using current device-manufacturing technology.

Key words CDMA, integrated circuits, neural networks, semiconductor devices

1. はじめに

ニューロンが相互に結合しているネットワークでは、ニューロン数の増加に伴いその結合数が指数関数的に増加する。この結合数の急激な増加は、ニューラルネットを集積回路化する際に配線部の面積増大(集積度の低下)という問題を引き起こす。そのため、相互結合ネットワークのような全結合のネットワークをハードウェア化することは難しい。この問題を解決するには、従来の方法とは違った方向でのシステムの構成が必要である。その一つとして、光ニューラルネットを使った大規模ニューラルネットの構成が提案されている [1]。光ニューラルネットはニューロン間の信号伝達を光で行うものであり、その信号伝達は三次元媒体(空気など)を通して行われる。従って、集積回路上でニューラルネットを作る場合と異なり、大規模なニューラルネットが構成できる。しかし、プロセス上の問題からそのハードウェア化は容易ではない。そこで、我々は既存の集積回路技術を用いて、大規模なニューラルネットを集積化できる新たなアーキテクチャを作りたい。本稿では、無線技術を用いてニューロン間の結合を実現するアーキテクチャを提案する。配線増大の問題を解決し大規模ニューラルネットを実装できれば、ニューラルネットの持つ優れた機能が利用可能となる。また、通信とニューラルネットの利点を融合させた、新しいネットワークや通信方式を開発できるかもしれない。

本稿では、はじめに無線技術を用いたニューラルネットについて概説する。次に、無線通信方式を用いたシステム構成例、静電場を用いたネットワークを用いたシステム構成例とその検討について報告する。

2. 無線シナプス/ニューロデバイス

表 1 に我々が提案する無線シナプス/ニューロデバイスの分類を示す。ニューロン間の結合を実現する方法を (1) 既存の通信方式を利用する方法、(2) 電磁場を利用する方法に大別した。

分類 (1) の「既存の通信方式を利用したニューラルネットワーク」は、無線通信方式を使って情報の伝達を行うものである。無線通信では電磁波により情報を伝達するが、電磁波はただ情報を載せるだけのものである。伝達する情報を自動車と見立てると、電磁波は道路であり、通信方式は車線を分ける為に用いられるものである。通信方式を利用したニューラルネットワークの構成を図 1 に示す。ネットワークの単位要素であるニューロンユニットは他のニュー

無線シナプス/ニューロデバイス				
(1) 従来の通信方式			(2) 近接電場作用を利用した方式	
FDMA	TDMA	CDMA	静電場	電磁波
1チップ上に1つのニューロンと多数のシナプスを集積			1チップ上に多数のニューロンを集積	
それぞれのニューロンチップは既存の通信方式(CDMAなど)を用いて信号を伝達する			それぞれのニューロンは電磁場を用いて信号を伝達する	

表 1 無線シナプス/ニューロンデバイスの分類

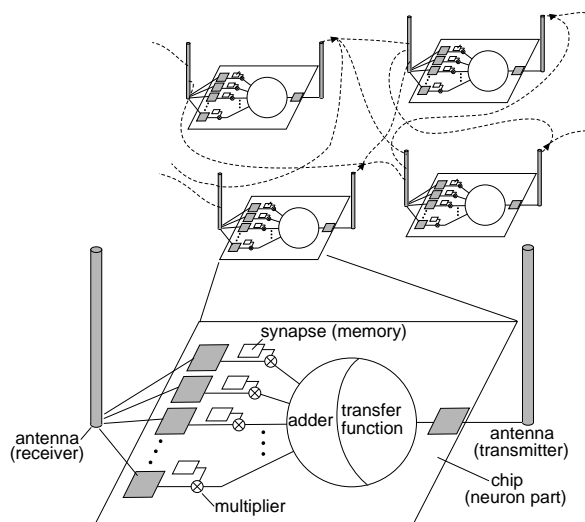


図 1 無線通信によって相互伝達を行うネットワーク

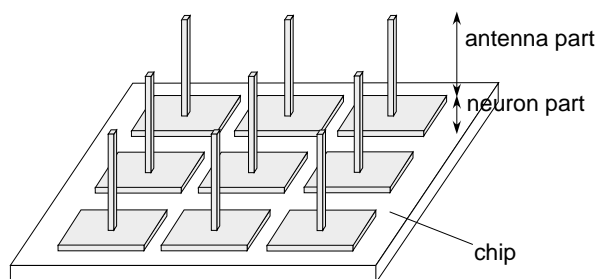


図 2 電磁場によって相互伝達を行うネットワーク

ロンの出力を受信部(receiver)で受け取る。乗算器(multiplier)は信号とシナプスメモリに記憶させた結合重みとを掛け合わせる。加算器(adder)は受信した信号を足しあわせる。足しあわせた信号を伝達関数(transfer function)により変換し、変換した信号を送信部(transmitter)がアンテナから送信する。このネットワークでは全てのニューロンが多対多の通信を行う。これは現在の携帯電話網と同じ構成である。従って、現在携帯電話に用いられている通信方式を利用することでネットワークを構成可能である。通信方式には現在移動通信の分野で利用されている

TDMA 方式, FDMA 方式, CDMA 方式などの多重接続方式 [2] が利用可能である。これらの方式では通信路を分割してユーザの識別を行う。そのため、それぞれのニューロンに対してシナプスの結合重みが異なるネットワークでも構成可能である。

分類 (2) の「電磁場を利用するニューラルネットワーク」では、電磁場 (電磁波もこれに含まれる) 自体が情報となる。1 チップ上に多数のニューロンを集積し、それぞれのニューロンが電磁場を発生 / 検知することで信号を伝達する。

電磁場を利用したニューラルネットワークの構成を図 2 に示す。ニューロンは電磁場を発生 / 検知する部分 (antenna part) とニューロンとしての情報処理を行う部分 (neuron part) を持つ。この方法は (1) の方法と違い通信路を分割しないため、自分への入力がどのニューロンからきたものなのか識別できない。しかし、空間対象なテンプレートを持つセルラーニューラルネットや結合が一様なネットワークではこの構成が利用可能である。また、回路構成の単純さから大規模なネットワークを簡単に構成することができる。

以下 3 章に (1) の方法の例として「CDMA 方式を用いたネットワーク」の構成例を示す。4 章に (2) の方法の例として「静電場を利用したネットワーク」の構成例を示す。

3. CDMA 方式を利用したネットワーク

現在の携帯電話網では多重接続方式として TDMA 方式, FDMA 方式, および CDMA 方式が利用されている。図 3 に示すように、TDMA 方式では時間, FDMA 方式では周波数, CDMA 方式ではそれぞれのユーザに与えられた識別符号で通信路 (channel) を分割する。TDMA 方式はチャンネルを時間で分割するので、この方式でニューラルネットを構成すると、一つのニューロンが信号を送っている間、他のニューロンは送信を行うことができない。このことから、TDMA 方式は実時間処理を行うニューラルネットには適していない。実時間処理を行うシステムを構成するには、FDMA 方式か CDMA 方式が適している。

CDMA の信号復調過程には、伝送信号からシグナル成分 (通信を行う相手の信号) とノイズ成分 (相手の信号とは無関係な信号) を分離する作業がある。このシグナル-ノイズ分離計算は、Hopfield ニューラルネットワークにおける個々のニューロンの入力 (local field) のシグナル-ノイズ分離計算と同じである。こ

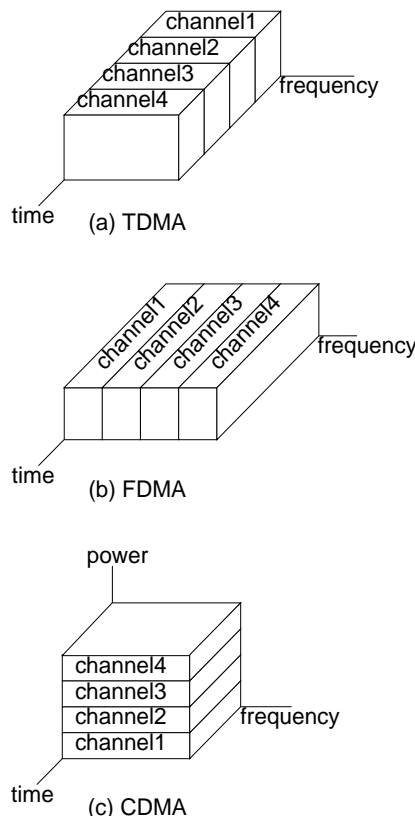


図 3 多重通信方式におけるプロトコルの例

のことに動機付けられて、Hopfield ネットワークと CDMA 通信システムを融合した「CDMA-Hopfield ネットワーク」の構成について検討することにした。

3.1 CDMA 方式

CDMA 方式は、近年移動通信の分野で広く利用されている。TDMA や FDMA 方式と違い、信号が周波数的 / 時間的に混在しても通信が可能である [2][3]。CDMA 方式では、各ユーザに特定の符号 (拡散符号) を割り当て、受信側でそれぞれの符号を照合することでユーザ間の通信を行う。以下、CDMA 方式の一つである直接拡散変調法を例に取り、CDMA 方式の原理を説明する。

CDMA 方式では、情報信号にそれとは無関係な雑音信号 (拡散符号) をかけ合わせて周波数帯域を広げる (これをスペクトル拡散という)。直接拡散法では、 ± 1 の値をとる周期乱数列を拡散符号として利用する。図 4 に、2 ユーザの場合の直接拡散法の変調および復調の仕組みを示す。

情報信号として、振幅が ± 1 の値をとる二種類の信号 (data1, data2) を送るとする。この信号は時間 T ごとに値が変化する。この時間 T をシンボルレートと呼ぶ。送信側 (transmitter) で、この情報信号に時間 $T_c (< T)$ ごとに値が変化する拡散符号 (code1,

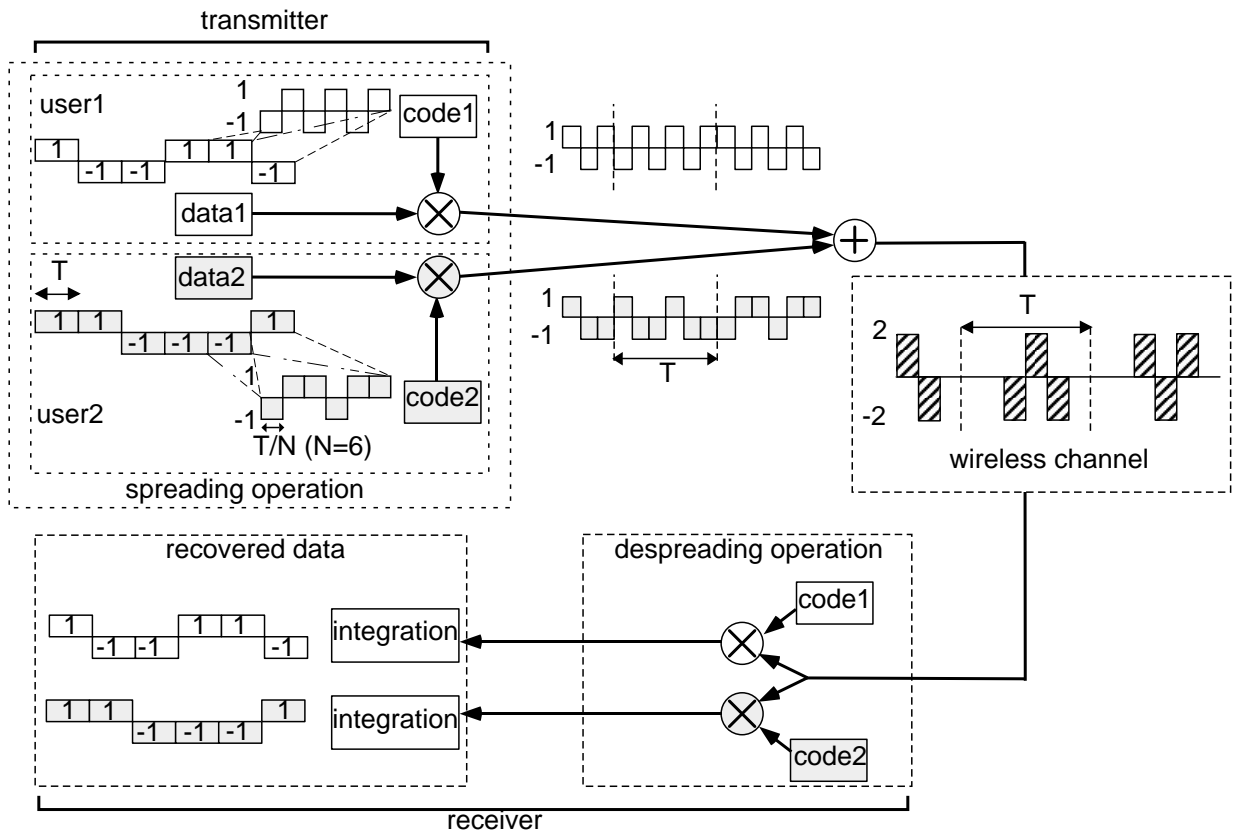


図 4 直接拡散法による CDMA の変調と復調の仕組み

code2) を乗算する。この時間 T_c をチップレートと呼ぶ。この拡散符号の乗算によって、情報信号の持つ周波数帯域は広がる。この操作を拡散と呼ぶ。拡散によって広がる帯域幅はシンボルレートとチップレートの比 (T/T_c) で決まる。その比 T/T_c が N の場合、情報信号の持つ周波数帯域は約 N 倍に広がる (図 4 では $N = 6$)。この N を拡散比と呼ぶ。各ユーザは拡散された情報信号を無線伝送路 (wireless channel) に送信する。無線伝送路では、各ユーザが送った信号が加算される。受信側 (receiver) で受信した信号に、通信を行いたいユーザが用いた拡散符号を乗算する。この操作を逆拡散と呼ぶ。逆拡散後の信号を、元の情報信号のシンボルレート T に渡り積分し、情報信号より高い周波数を持つ成分を除去する。これらの操作で、ユーザ間の情報伝達が可能になる。一連の計算で最終的に得られるユーザ i の復元信号 $D_i(n)$ は

$$D_i(n) = \frac{1}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} c_i(t) \sum_{a=1}^P d_a(t) c_a(t) dt, \quad (1)$$

となる。ここで T をシンボルレート、 $c_i(t)$ はユーザ i の拡散符号、 $d_i(t)$ はユーザ i の情報信号、 n は情報信号の n 番目のビット、 P はユーザ数をあらわす。

3.2 CDMA-Hopfield ネットワーク Hopfield ネットワークのダイナミクスは

$$\tau \frac{du_i}{dt} = -u_i + \sum_{j \neq i}^N J_{ij} f(u_j), \quad (2)$$

である。ここで、 u_i はニューロンの膜電位、 $f(x)$ は伝達関数、 N はニューロン数であり、また J_{ij} は

$$J_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^P \xi_i^\mu \xi_j^\mu, \quad (3)$$

で表される結合重みである (P は記憶させたいパターン数、 ξ^μ は記憶させたい μ 番目のパターン)。

通常、Hopfield の連想記憶モデルでは伝達関数として、シグモイド型の単調増加関数を用いられる。しかし、ニューロンの伝達関数に非単調な関数を用いるとネットワークに新しい機能が加わる。例えば記憶容量が約三倍に増加し、また想起の際に障害となるノイズ成分が完全に消失するような相も生まれる [4]。従って、CDMA 方式を使って Hopfield ネットワークを構築する際に非単調な伝達関数を用いれば、CDMA のノイズが消失するような効果が得られるかもしれない。このことを期待して、ネットワークに連続時間で動作する Hopfield ネットワークを採用した。

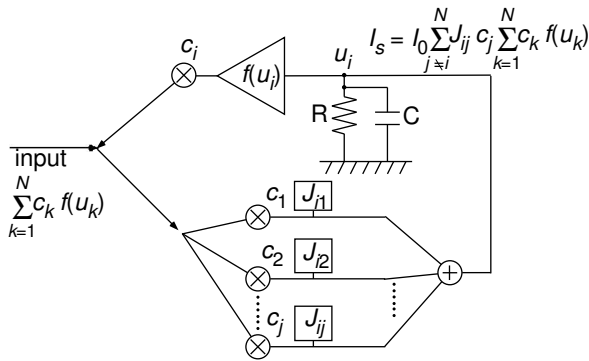


図5 CDMA-Hopfield ネットワークの単位ニューロン

CDMA方式を利用したHopfieldネットワークの単位ニューロンの構成を図5に示す。CDMA方式で信号の伝達を行うために、ニューロンの出力 $f(u_i)$ に拡散符号を乗算する $[c_i f(u_i)]$ 。受信する信号は全てのニューロンが送った信号の和である。CDMA方式では、受信した信号を逆拡散した後、シンボルレート T に渡り逆拡散後の信号を積分し、それを T で除算する。しかし、Hopfieldネットワークは連続時間で動作することから、(1)のCDMA計算のように時間を区切って積分を行うことができない。しかし、この積分はHopfieldネットワークのダイナミクスの中にも含めることができる(後述)。

Hopfieldネットワークのダイナミクスを

$$\tau \frac{du_i}{dt} = -u_i + \frac{1}{\tau} \sum_{j \neq i}^N J_{ij} \left(c_j \sum_{k=1}^N c_k f(u_k) \right), \quad (4)$$

で表す。 u_i の増減は時定数 τ のオーダの時間遅れを伴う。 u_i は τ 秒前の u_i の値を時間的に重ねあわせたもの(任意の時刻 t_0 から $t_0 + \tau$ の時間積分)である。つまり、 τ をシンボルレートとすれば(ニューロンの出力は周期信号でないため)、(4)はCDMAの計算(1)の右辺の積分計算を含むことになる。

3.3 シミュレーション結果

CDMA-Hopfieldネットワーク(4)の連想記憶シミュレーションを行った。200個のニューロン($N = 200$)を持つネットワークに20種類のランダムパターンを記憶させた。非単調Hopfieldネットワークで見られる記憶容量の増加や記憶パターン間ノイズの消失といった現象が、非単調CDMA-Hopfieldネットワークでも起こるか確かめたい。そのため、非単調な伝達関数を用いてCDMA-Hopfieldネットワークのシミュレーションを行った。同じネットワークに40種類のパターンを記憶させた場合のシミュレーション

も行った。

ネットワークには記憶パターン中の40個のビットを反転したノイズパターンを初期値として与えた。それぞれの記憶パターンにつき50個ずつのノイズパターンを生成し、初期値として与えた。

図6にシミュレーションの結果を示す。比較のため、通常の(CDMAを用いない)Hopfieldネットワークの連想記憶結果を併せて示す。図6の横軸は初期パターンがどの記憶パターンを元にしたノイズパターンであるかを表し、縦軸はどの記憶パターンが想起されたかを表す。想起されたパターンがどの記憶パターンとも一致しない場合がある。その場合は、想起パターンと全ての記憶パターンの相関を計算し、相関が最も高いパターンを想起パターンとしてカウントした。想起された回数をグレースケールで表し、一番想起された回数の多いものを白、全く想起されていないものは黒とした。

20(40)パターンを記憶させたHopfieldネットワークでは全ての対角要素の値が20(40)となり、正しい記憶想起が確認できた。20パターンを記憶させたCDMA-Hopfieldネットワークでは、初期パターン以外のパターンが想起された回数は少なかった(後述)。40パターンの場合は、正しい想起はほぼ不可能であった。なお、単調な伝達関数を用いたCDMA-Hopfieldネットワークでも同様のシミュレーションを行ったが、上記の結果とほぼ同じであった。

図6の結果だけでは、連想記憶の能力を完全に評価したとは言えない。そこで、連想記憶の能力を定量的に評価するため、

$$\text{想起率} = \frac{\text{正しく想起されたパターン数}}{\text{初期値として与えたパターン数}}, \quad (5)$$

を定義する。本稿では、初期値の元となる記憶パターンと想起パターン間の相関が0.95を超えた場合を正しい想起と仮定であるとした。200個のニューロンに20パターンを記憶させた場合は、単調なニューロンのCDMA-Hopfieldネットワークの想起率は0.898、非単調CDMA-Hopfieldネットワークでは0.899となった。通常のHopfieldネットワークの想起率1.000と比べて特性は落ちるが、記憶の想起が行われていることを確認した。40パターン記憶させた場合は単調、非単調なCDMA-Hopfieldニューロンのネットワークで想起率がそれぞれ0.000、0.001となりほとんど記憶が想起されないという結果であった。このことは、非単調なニューロンを用いることによるノイズの消失効果、記憶容量の増加といった特性をCDMA-Hopfieldネットワークが持たないことを示している。

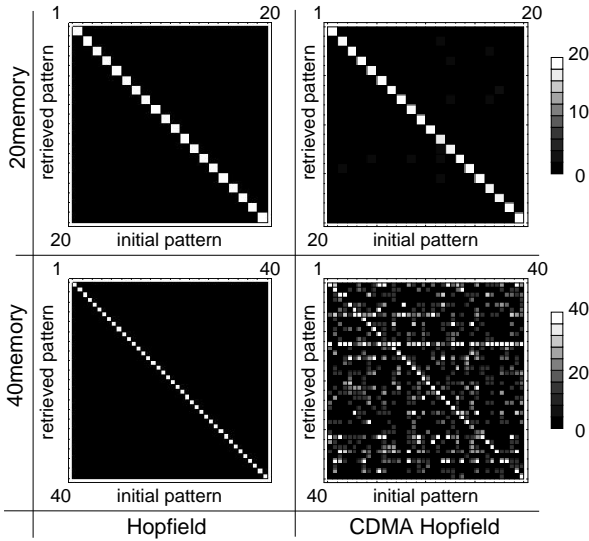


図6 連想記憶シミュレーションの結果

200個のニューロンのうち3個のニューロンを抽出し、想起過程での膜電位の時間変化を調べた。非単調な伝達関数を用いたHopfieldネットワークのシミュレーション結果を図7に示す。CDMAを用いない場合は、記憶パターン数が20(40)の両方で膜電位がほぼ $\pm\theta$ (θ は非単調伝達関数のしきい値で、ここでは0.4と設定)である[図7(a), (b)]。それに対して、CDMA-Hopfieldネットワークの膜電位は安定せず、その振幅はほぼ0であった。これは、CDMA通信部で完全な復元が行えないため、ニューロンの入力に拡散によるノイズが残るためである。ニューロン i の拡散符号で復元された信号 $D_i(n)$ とすると、CDMA-HopfieldネットワークのCDMA部分は

$$D_i(n) = \frac{1}{T} c_i(t) \sum_{a=1}^P d_a(t) c_a(t), \quad (6)$$

である。ここで、 $d_i(t)$ はニューロン i が送信した情報信号、 n は情報信号の n 番目のビット、 $c_i(t)$ はユーザ i の拡散符号、 T はシンボルレート、 P はニューロン数をあらわす。ニューロン i の信号成分は $d_i(t)$ 、雑音成分は $\sum_{a \neq i}^P d_a(t) c_a(t)$ である。情報信号 $d_i(t)$ と拡散符号 $c_i(t)$ は、共に ± 1 の値をランダムにとるので、この雑音成分は平均0、分散 P のガウシアンノイズで近似できる。ユーザ数 P の増加に伴いノイズの分散が増加する(ホワイトノイズに近づく)。それに関わらず、($N = 200, P = 20$ のネットワークで)正しい想起が行なわれる(図6)という結果は非常に興味深い。

3.4 離散時間で動作するネットワーク

前節では、非単調な伝達関数を持つニューロンが

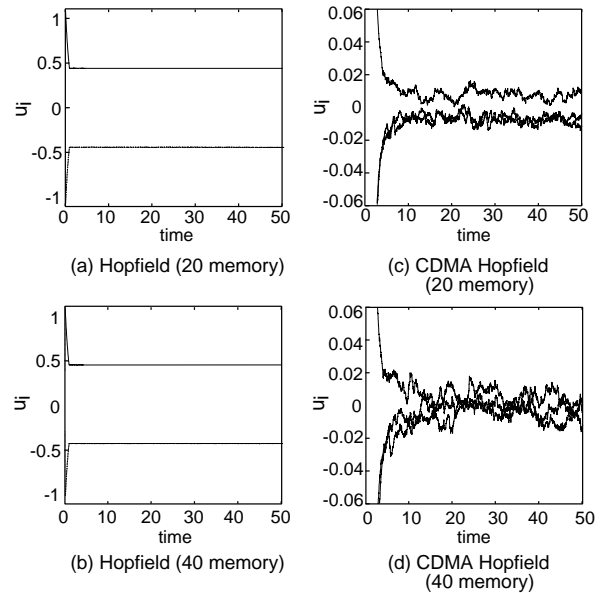


図7 ニューロンの膜電位の時間変化

ら成るHopfieldネットワークの記憶容量の増大、ノイズ消失特性から得られる効果を期待して、連続時間で動作するHopfieldネットワークをCDMA方式を用いて構成した。そのために、信号の復元の際の積分をばぶいて連続時間に形を変えたCDMA方式でネットワークを構成した。しかし、離散時間で動作するネットワークであれば、CDMA方式に形を変えることなく用いることが可能である。具体的には、離散時間で動作するネットワークのタイムステップを T_d とし、この T_d をCDMA方式におけるシンボルレートと同じにする。信号の受信の際、 T_d に渡り届いた信号を積分することでそれぞれのニューロンが送った信号を完全に復元できる。従って、ネットワークの完全動作と大規模化が実現できる。

4. 近接電場効果を利用したネットワーク

前章では無線通信方式を使って多数のニューロチップのネットワークにおける情報伝達を行った(チップ分散型処理)。それに対して本章では、従来通りチップ内に多数のニューロンを集積するという方針のもとでネットワークを構成する。本稿では「静電場によるニューロン間の無線シナプスデバイス」の構成法について検討を行った。この方法では、空間対象なテンプレートを持つセルラーニューラルネットや結合が一様なネットワークが利用可能である(後述)。

4.1 ネットワークの構成

チップ上のニューロン間の信号伝達を無線で行う

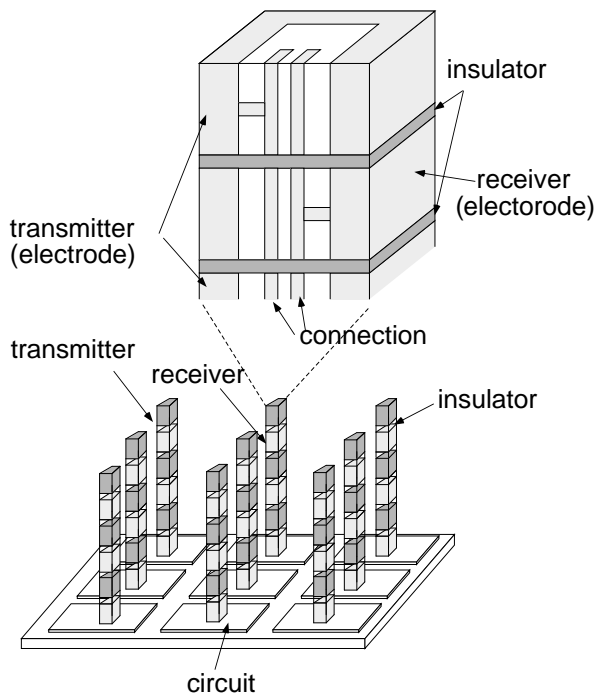


図 8 静電場に基づくシナプス/ニューロデバイスの構成例

ために、本稿では静電磁場を利用する。チップ上のニューロンが静電磁場を発生/検知するように、ニューロンごとに微小アンテナデバイスを設ける。ニューロンがアンテナデバイスに電位を与える(ニューロンが発火すると、周囲の電場が変化する。周囲のニューロンはその電場の変化をアンテナデバイスを通して検知する。ニューロン(アンテナデバイス)間の構造をキャパシタと等価にして、ニューロン同士を容量結合する。そのようなネットワークの構成案を図 8 に示す。

一つの電極(アンテナデバイス)では発信と受信を同時に行うことができないため、発信部と受信部を個別に作る。個別に作った受信部によって発信部が発生する電場が妨害されると、周囲のニューロンに与える影響が均一でなくなる。発信部と受信部を絶縁体をはさんで柱状に積み重ねることで、水平方向には電場を妨害する受信部がなくなるので周囲に均一な分布を持つ電場を発生することができる。このような単位ニューロンを等間隔に配置することでネットワークを構成する。電場は減衰を持って分布するため、自分自身の発生する信号を自分自身の受信部が最も強く受けることになる。この影響を消すためのキャンセル回路を個々のニューロンにつける。

4.2 単位ニューロンのシミュレーション結果 既存の集積回路技術を考慮して、提案したネット

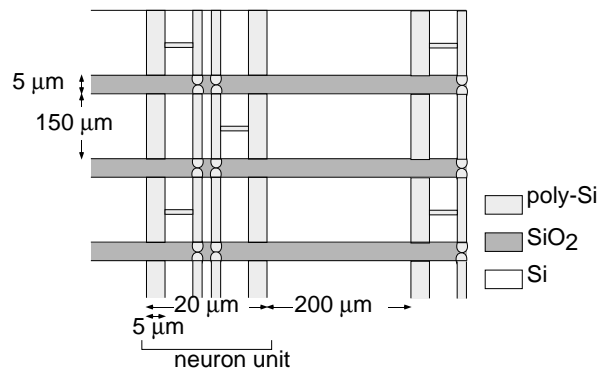


図 9 三次元アンテナデバイスの構成案

ワークを実現した場合のサイズ、材料からパラメータ(容量)を見積もり、単位ニューロンの動作シミュレーションを行った。自分自身の発生する信号からの影響をキャンセルしたいので、ニューロン間の容量を同ニューロンの発信電極と受信電極間の容量(内部容量)より大きくする。そのために、ニューロン間の材料に同ニューロンの発信電極と受信電極間の材料(SiO_2)より比誘電率の高い材料(Si)を使う。ニューロン間の距離に対してニューロンの幅が大きいと、その電極で電気力線が終端してしまい電場の広がりを妨げることがある。それを防ぐためニューロンの電極の幅に対して、ニューロン間の距離を 10 倍にした(図 9)。この構造は、例えば三次元集積回路技術[5]を使えば実現可能である。

図 9 よりニューロンの内部容量とニューロン間の容量を計算し、図 10 に示す等価回路およびキャンセル回路のシミュレーションを行った。受信部でのニューロン間の合成容量 C_{rec} を 11.95 fF, 自分自身の受信部-送信部間の容量 C_{self} を 10.35 fF, C_1 を 204.4 nF, C_2 を 295.6 nF, R は 100 M Ω とした。ニューロンの発信電極の電位 V_0 , 外部からの入力 V_{in} は 0 V から 5 V まで変化させた。

ニューロンの動作が、発信のみ、発信受信両方、受信のみ、の三つの場合について SPICE シミュレーションを行った。キャンセル回路を通した後の電圧 V_{out} を図 11 に示す。

キャンセル回路を通した後の出力は、自身が信号を出していない場合(図 11 中の B)と出している場合(図 11 中の C)でほぼ同じ(誤差 1 mV 以下)であった。また、ニューロンが信号を発している状態で外部から入力がない場合(図 11 中の A)は、出力が最低値となった。これらの結果から、単位ニューロンのキャンセル回路が正しく動作していることを確認した。

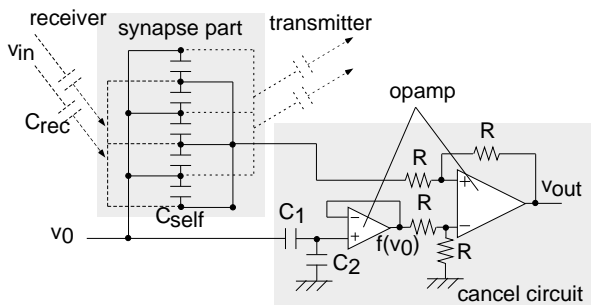


図 10 単位ニューロンの等価回路とキャンセル回路

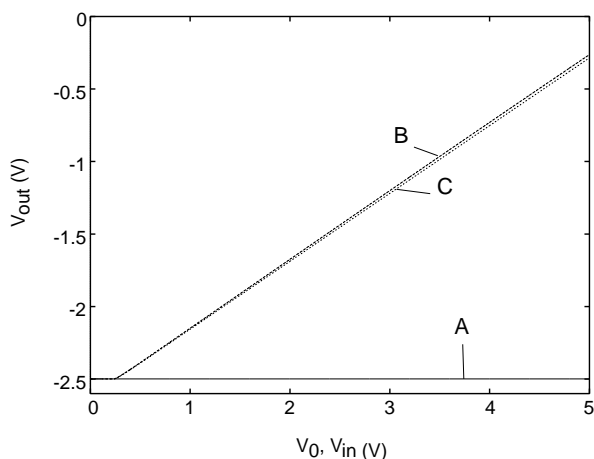


図 11 キャンセル回路のシミュレーション結果

5. まとめ

本稿では、ニューラルネットの結合を通信方式、または近接電場効果を用いて無線で実現する方法を提案した。

通信方式を用いた方法では、1チップに1ニューロンを実装し、多数のチップを通信方式を利用して結合してネットワークを構成するという、ニューラルネットをハードウェア化するための新しい手法を提案した。CDMA方式を用いてHopfieldネットワークを構成し、連想記憶のシミュレーションを行った。非単調な伝達関数を持つニューロンを用いることによる記憶容量の増加、ノイズの消失効果は見られなかった。しかし、記憶パターン数がニューロンの1割程度であれば正しい想起が行えるという結果が得られた。

近接電場効果を利用した方法では、ニューラルネットワークの静電効果を用いた構成法を提案した。そのネットワークの実デバイスでのパラメータを見積もり、単位ニューロンの動作を確認した。

今回提案した構造では電場の減衰を利用して局所的な結合を持った系を構成した。結合が一様なネッ

トワークを構成する際には、その電場の減衰のせいで一様な結合が実現できない。デバイス構造を工夫、もしくは信号の伝達方法を変えることで一様結合のネットワークを構成できないか検討中である。

文献

- [1] 久間 和生, “光ニューロチップ,” 応用物理 第 62 号, pp. 32-35, 1993.
- [2] 丸林 元, 中川 正雄, 河野 隆二, スペクトル拡散通信とその応用, (社)電子情報通信学会, 東京, 1998.
- [3] 立川 敬二 監修, *W-CDMA 移動通信方式*, 丸善 (株), 東京, 2000.
- [4] M. Shiino and T. Fukai, “Self-consistent signal-to-noise analysis of the statistical behavior of analog neural networks and enhancement of storage capacity,” *Phys. Rev. E*, Vol. 48, pp. 867-897, 1993.
- [5] M. Koyanagi, H. Kurino, K.-W. Lee, K. Sakuma, N. Miyakawa, and H. Itani, “Future system-on-silicon LSI chips,” *IEEE MICRO*, vol. 18, pp. 17-22, 1998.