

進化型ハードウェア技術のマイクロ波回路への適用

河西 勇二[†] 坂 無 英 徳[†] 高 橋 栄 一[†]
村 川 正 宏[†] 樋 口 哲 也[†]

携帯電話に代表される現代のマルチメディアや携帯モバイル通信にはマイクロ波回路は必要不可欠であるが、おおむね 1 GHz 以上というマイクロ波の周波数領域では、分布定数回路として取り扱う必要があるために回路設計が困難をきわめ、また、熟練技術者でさえも回路調整が困難である。このような問題を解消するため、我々は、遺伝的アルゴリズム (GA) による自律調整機能を組み込んだ進化型マイクロ波回路を提唱する。この手法を適用して、進化型マイクロ波回路の具体例として進化型イメージリジェクションミキサを開発した。これにより、上記の困難な問題が解消され、技術者による調整結果 (イメージ信号除去比が 55 dB \approx 32 万倍) よりも良い特性 (同 69.7 dB \approx 930 万倍) が得られた。

Application of Evolvable Hardware Technique for a Microwave Circuit

YUJI KASAI,[†] HIDENORI SAKANASHI,[†] EIICHI TAKAHASHI,[†]
MASAHIRO MURAKAWA[†] and TETSUYA HIGUCHI[†]

Microwave circuits are indispensable for mobile and multi-media communication. However, these circuits are very difficult to design, because of the nature of distributed-constant circuits in the microwave range (i.e., over 1 GHz). These circuits are also difficult to adjust for optimum performance, even for experienced engineers. In order to overcome these problems, we propose an EHW-based microwave circuit where performance adjustment is carried out automatically by a GA. This circuit eliminates those problems. In this paper, we present an EHW-based image-rejection mixer circuit, which we have developed with this approach, and experimental data (69.7 dB) that demonstrates that the automatically adjusting circuit is capable of outperforming a circuit adjusted by an experienced engineer (55 dB).

1. はじめに

アナログ電子回路は、一般に素子のバラツキや寄生容量 / 寄生インダクタンス成分により実際の回路特性が設計上期待される特性よりも低下する問題がある。この問題は、動作周波数が高くなるとより顕著になる。また、信号の周波数が 1 GHz 以上であるマイクロ波回路では、分布定数回路の特性のために回路設計が困難をきわめ、熟練技術者でも回路調整が困難である。

このようなアナログ電子回路、とりわけマイクロ波回路の課題を解決する有効な手段として進化型ハードウェア技術¹⁾に注目し、本論文では、進化型ハードウェア技術^{1)~3)}に基づいた、遺伝的アルゴリズム (GA)⁴⁾

により自動的に調整されるマイクロ波回路を提案する。

マイクロ波回路の例として、イメージリジェクションミキサ回路を取り上げる。イメージリジェクションミキサは、次世代携帯電話や衛星放送等のマイクロ波信号を、中間周波数と呼ばれる低い周波数の信号に変換するものである。このとき、イメージ信号と呼ばれる不要信号が出力に極力現れないようにする必要があり、この性能をイメージ信号除去比という。実験で試作したイメージリジェクションミキサ回路を技術者が調整したところ、イメージ信号除去比は 55 dB (32 万倍) が得られたが、GA による調整では 69.7 dB (930 万倍) が得られた。

本論文は、2 章でイメージリジェクションミキサを概説し、3 章で進化型イメージリジェクションミキサの構成を述べる。4 章で GA の適用について述べ、5 章で、この進化型イメージリジェクションミキサの調整実験について、GA、山登り法、技術者による調整により得られる結果の比較を行う。6 章で結論を述べる。

[†] 半導体 MIRAI プロジェクト、産業技術総合研究所次世代半導体研究センター

MIRAI Project, Advanced Semiconductor Research Center (ASRC), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

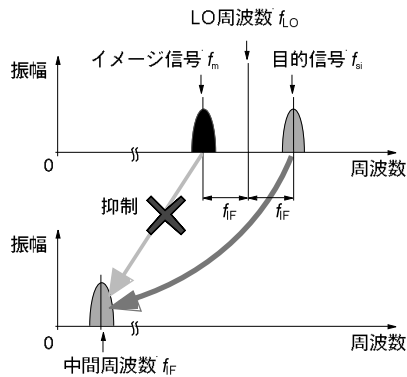


図1 イメージ信号周波数 f_m 、目的信号周波数 f_{si} 、局部発振周波数 f_{LO} 、中間周波数 f_{IF} の関係

Fig. 1 Relation between image signal frequency f_m , desired signal frequency f_{si} , local oscillator frequency f_{LO} , and intermediate frequency f_{IF} .

2. イメージリジェクションミキサ

イメージリジェクションミキサ^{5)~8)}は、バランス動作により不要信号であるイメージ信号を打ち消して目的信号のみを低い周波数に変換するもので、携帯電話をはじめ無線を使う情報機器で重要な回路である。図1に信号の入出力の関係を示す。理想的にはイメージ信号 (f_m) はミキサ回路で完全に除去されて出力には目的信号 (f_{si}) 以外は現れないが、実際には回路素子のバラツキや分布定数回路の特性により一部が出力される。

中間周波数 f_{IF} は、目的信号周波数 f_{si} と局部発振周波数 f_{LO} の差であり、 f_{LO} を中心に f_{si} と鏡像 (イメージ) 関係にある周波数 (イメージ信号周波数) f_m も同時に周波数変換されて中間周波数信号に現れてしまう。中間周波数の信号の品質を損なわないためには、イメージ信号の出力を極力抑える必要がある。ミキサのイメージ信号を除去する能力は、イメージ信号除去比と呼ばれ、同じ強度の目的信号とイメージ信号の入力に対し、中間周波数に出力される信号強度の割合である。

イメージリジェクションミキサの利点は、他の周波数変換の方式であるヘテロダイン方式と比較して、フィルタが不要であるので集積化に適し、また、信号の隣接するチャネルとの分離が容易で、中間周波数を低くできるので低消費電力化が可能である。

3. 進化型イメージリジェクションミキサ

3.1 回路構成

図2に進化型イメージリジェクションミキサの構成を示す。このイメージリジェクションミキサは、2

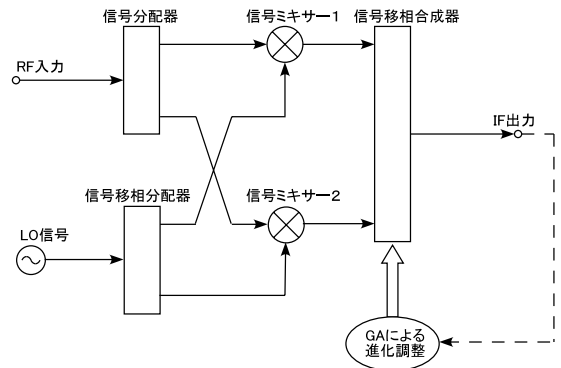


図2 進化型イメージリジェクションミキサの構成

Fig. 2 Block diagram of the EHW-based image-rejection mixer.

つの信号ミキサ、信号分配器、信号移相分配器、信号移相合成器から成る、最も単純な回路構成であり、動作原理に忠実な実装である。実験で用いる周波数は、blue tooth 等で用いられる 2.4 GHz 帯の周波数を選択した。具体的には、目的信号周波数 f_{si} を 2.441 GHz、局部発振周波数 f_{LO} を 2.440 GHz、中間周波数 f_{IF} を 1 MHz とした。また、信号の帯域は 200 kHz とした。

このとき、イメージ信号周波数 f_m は、2.439 GHz であり、このイメージリジェクションミキサは、できるだけイメージ信号を除去しながら目的信号を中間周波数に変換する。できるだけ高いイメージ信号除去比を得るために、このミキサの信号移相合成器の回路定数が GA により進化調整される。

今回試作した進化型イメージリジェクションミキサは、GA による調整の有効性を示すことが目的であり、一般的なディスクリートの部品によって構成されている。

3.2 回路動作

マイクロ波信号の入力 (RF 入力) は、信号分配器で 2 つの信号ミキサに同じ位相で分配される。一方で、局部発振器 (LO) の信号は、信号移相分配器により 2 つの信号ミキサに 90° の位相差を持って分配される。それぞれの信号ミキサは、RF 信号と LO 信号の差の周波数 (f_{IF}) の信号を出力し、この信号は信号移相合成器で 90° の位相差をつけて合成される。ここで、2 つの信号ミキサを通る 2 つの信号の経路ができるが、この 2 つの経路を通る信号は、信号移相合成器で合成される際に、目的信号は同位相で加算され、イメージ信号は逆位相で合成される。2 つの経路における信号の振幅と位相差が完全なものであれば、イメージ信号が完全に打ち消されて出力 (IF 出力) にはまったく現れない。しかしながら、回路素子の値のばらつきや、

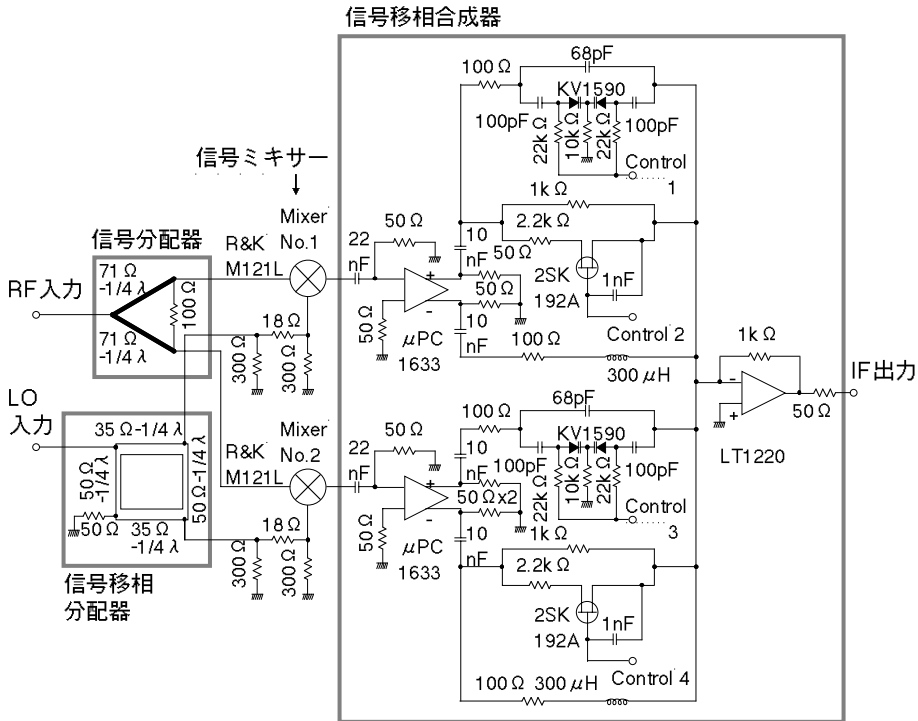


図3 試作した進化型イメージリジェクションミキサの回路
 Fig. 3 Circuit diagram of the EHW-based image-rejection mixer.

回路の寄生容量，寄生インダクタンスのために信号の振幅や位相が完全なものとならず，幾許かのイメージ信号が出力される^{5),8)}。

我々の提案する進化型イメージリジェクションミキサでは，GAによって回路の伝達特性が，イメージ信号に対して2つの信号経路で同じ振幅で逆位相となるように調整され，高いイメージ信号除去比が得られる。図3に試作したイメージリジェクションミキサの回路を示す。信号分配器と信号移相分配器は，分布定数回路であるマイクロストリップ線路（信号分配器はウィルキンソンカプラ，信号移相分配器はブランチドハイブリッド回路）を用いた。信号ミキサは，ダブルバランスドミキサのモジュール（R&K社製M121L）を用い，信号移相合成器は複数のディスクリット素子を用いて構成した。

4. イメージリジェクションミキサの進化調整

この章では，GAによるイメージリジェクションミキサの自動的/自律的な調整について述べる。

4.1 信号移相合成器の調整回路

信号移相合成器のゲイン（増幅率）と位相差がGAによって調整される。図4に信号移相合成器の調整回路の構成を示す。それぞれ2つずつのコンデンサ，抵

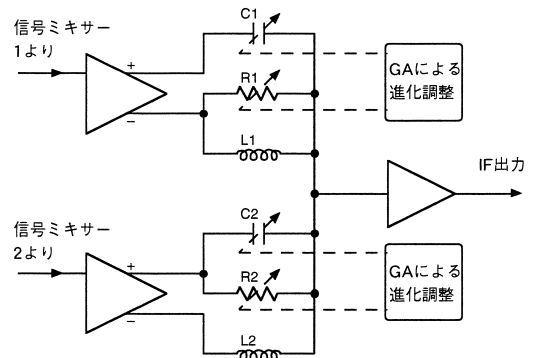


図4 信号移相合成器の調整回路の構成
 Fig. 4 Schematic representation of the adjustable phase-shifter/combiner in the image-rejection mixer.

抗，コイルによりIF信号の移相が行われる。コイルのインダクタンスL1とL2を固定したままで，コンデンサC1とC2の静電容量および抵抗R1とR2の抵抗値の4つのパラメータを変換することで，2つの信号の振幅比と位相差をイメージ信号が最小になるように調整することができる。

図5(a)は，可変容量ダイオードを用いてコンデンサC1とC2の静電容量を変換する具体的な回路を示す。調整値に対応するバイナリービット列（GAの

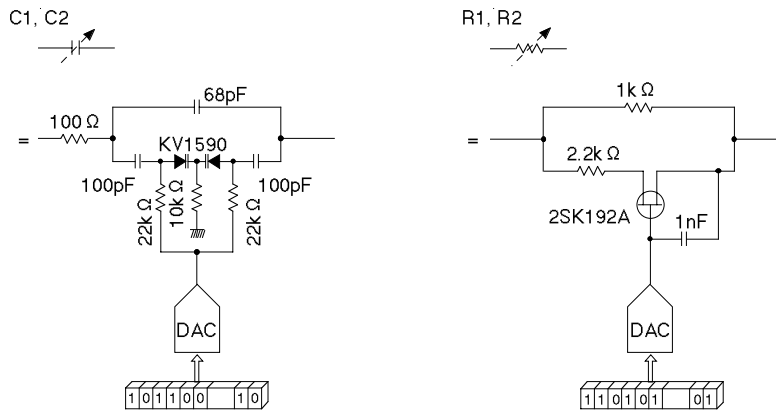


図5 (a) 調整回路のコンデンサ C1, C2 の実装回路, (b) 調整回路の抵抗 R1, R2 の実装回路
Fig.5 (a) Actual circuit for the adjustable capacitors C1 and C2, (b) Actual circuit for the adjustable resistors R1 and R2.

染色体)を DA コンバータに入力することにより C1 と C2 の静電容量が設定される。DA コンバータの出力電圧は制御電圧として可変容量ダイオードの逆バイアス電圧となる。同様に、図 5 (b) は、電界効果トランジスタ (FET) を用いて抵抗 R1 と R2 の抵抗値を可変にする回路を示す。DA コンバータの出力電圧は FET のチャネル抵抗を変化させる。各調整ビット列 (染色体) の長さは、すべて 12 ビットである。調整の分解能を決定するバイナリービット列のビット数と、静電容量と抵抗値の調整範囲は、ミキサの回路設計に基づき決定した。

GA によるコンデンサ C1 と C2 と抵抗 R1 と R2 の調整で、マイクロストリップ線路の幅や長さの誤差、回路素子の値のパラツキや回路の寄生容量、寄生インダクタンスによる信号の位相のずれ、振幅のずれを補正して、イメージ信号を低減しイメージ信号除去比を向上することができる。

4.2 遺伝的アルゴリズム

実験は定常進化型の遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。これは、(1) 集団からランダムに 1 個体を選択し、(2) 各世代で最も適応度の高い個体と一様交叉させ、(3) 新しく生成された個体に突然変異を加え、元の選択された個体と置換する方式である。一様交叉におけるマスクビットは、一様乱数により生成した。また、集団を構成する個体数は 30、突然変異率は 1/72 とした。

GA の評価関数を決定するために、次の 3 通りの評価関数を最大化する予備実験を行った。(1) 中間周波数の帯域 (バンド) の両端 ($f_{IF}=0.9, 1.1$ MHz) のイメージ信号除去比の最小値、(2) バンドの両端のイメージ信号除去比の平均、(3) バンド中心 ($f_{IF}=1$ MHz)

とバンド両端 ($f_{IF}=0.9, 1.1$ MHz) における 3 つのイメージ信号除去比をバンド中心の値のみ 2 倍する加重平均。その結果、(3) の評価関数を採用することとした。GA では、この評価関数値が最大となるように進化調整を行う。

5. 調整比較実験

この章では、GA によるイメージリジェクションミキサの調整を評価するために、山登り法、手動調整との比較実験について述べる。

5.1 進化型イメージリジェクションミキサの実験の構成

進化型イメージリジェクションミキサの実験の構成を図 6 に示す。進化調整されるイメージリジェクションミキサ回路、RF 信号発生器 (Agilent E4422B)、LO 信号発生器 (HP8341B)、IF 信号強度を計測するスペクトラムアナライザ (HP8591E)、GA を実行する PC、PC に接続する DA コンバータのインタフェースから成る。信号発生器は、イメージリジェクションミキサ入力に接続し、PC からの制御により周波数を切り替えながらイメージ信号除去比を測定するためのテスト信号 (信号強度 0.1 mW) を発生する。スペクトラムアナライザで計測された IF 信号強度のデータは PC に転送され、PC 上でイメージ信号強度の算出と GA が実行される。GA により求められた新しいビット列 (染色体) は、インタフェースを介してイメージリジェクションミキサの DA コンバータに設定される。

5.2 実験結果と考察

イメージリジェクションミキサのイメージ信号除去比を向上させる調整実験を、GA、山登り法 (IHC)、技術者による調整の 3 通りについて行い、比較した。

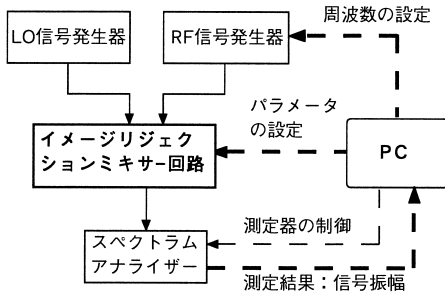


図6 進化型イメージリジェクションミキサの実験の構成
Fig. 6 Block diagram of the setup for evolving the image-rejection mixer.

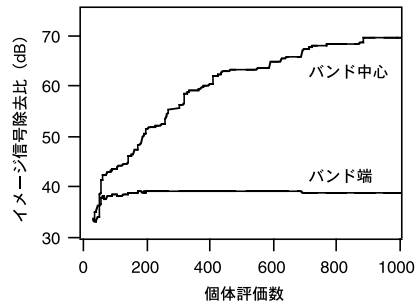


図7 GA調整により得られたイメージ信号除去比と個体評価数
Fig. 7 Averaged image rejection ratio curve for the GA evolutions. The upper curve and the lower curve are the measured image rejection ratio at the center and at the edge of the IF band respectively.

表1 イメージリジェクションミキサの調整方法による比較実験結果

Table 1 Results of adjustment comparison experiment by adjustment method.

調整方法	イメージ信号除去比 (dB)	
	バンド中心	バンド端
GA	69.68	38.98
IHC	41.85	35.18
技術者	55	35
無調整	23.40	23.38

表2 IHCによる調整実験結果

Table 2 Experimental results for the IHC.

	イメージ信号除去比 (dB)	
	バンド中心	バンド端
平均	41.85	35.18
最大	60.05	39.79
最小	27.49	25.43
σ^2	71.33	12.96

その実験結果を表1に示す。GAによる調整は、IHCおよび技術者による調整よりも良い結果が得られている。

IHCによる調整は、ランダムに選んだ開始点からの山登り法による探索を繰り返す方法で行い、このIHCを21回試行した。表2にIHCによる調整で得られたイメージ信号除去比を示す。試行の平均で、IFバンドの中心では41.9dB(1万5千倍)、バンド端では35.2dB(3,300倍)が得られた。

技術者による調整は、調整者がRF周波数に対するIF信号強度をスペクトラムアナライザで観測しながら、調整設定値を手動で可変して行った。その結果、イメージ信号除去比55dB(32万倍)が得られた。

GAによる調整結果を、図7に示す。個体評価数に対するイメージ信号除去比の変化を10試行の結果について平均した。IFバンド中心で69.68dB(929万倍)のイメージ信号除去比が得られ、この値は、IHCの結

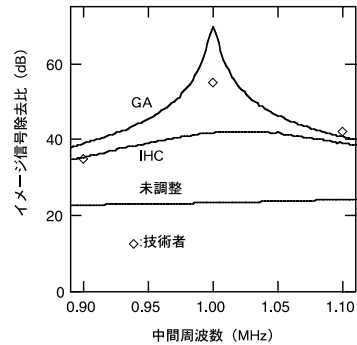


図8 イメージ信号除去比のIF周波数依存性

Fig. 8 Characteristics of the image rejection ratio as a function of intermediate frequency.

果の最高値よりも9.6dB(9倍)高く、また、IFバンド端においても、IHCの結果の平均値よりも3.8dB(2.4倍)高い結果となった。調整に要した時間はいずれの場合も30分程度であるが、このうちGA操作に要した時間は1秒未満であった。図8に、3通りの実験結果をIF周波数特性として示す。以上の3通りの実験結果から、GAによるイメージリジェクションミキサの調整結果が、IHCによる調整、技術者による調整の結果よりも優れていることが分かる。

したがって、自律的なイメージリジェクションミキサの性能調整においてGAはきわめて有効であることが実験結果より実証できた。

6. おわりに

マイクロ波回路の設計、製造後の調整には多大な時間とコストが必要であり、これが重要な課題となっている。携帯モバイル通信の急速な発展の状況を鑑みると、この問題の解決は急務であると考えられる。本論文では、進化型マイクロ波回路を提唱し、GAを適用した進化型イメージリジェクションミキサ回路の評価

実験を行った。実験では、GA による調整、IHC による調整、技術者による調整の 3 通りの方法において比較実験を行い、GA を適用した調整の優位性、有用性を示した。

今後の展望として、より実用的な回路構成を用いた実証実験、回路の LSI 化、広帯域化、調整の高速化を進める予定である。具体的には、測定システムの改善により 100 倍以上の高速化を見込んでいる。また、マイクロ波回路において、本方式の調整システムを一体化することにより回路動作中においても調整が可能となるシステムに発展できると考えられ、このような構成は、特に計測機器に有効であると予想される。本研究では、マイクロ波回路の寄生効果の対策に的を絞った調整により回路特性を向上させたが、回路設計段階において回路シミュレータ上でこの技術を適用すれば、回路の周囲温度等の環境条件の変化に対しても安定した高い特性を維持する回路を実現できると考えられる。

謝辞 本研究の一部は NEDO から委託されて実施した。日頃ご指導いただく廣瀬全孝次世代半導体研究センター長に感謝する。

参考文献

- Higuchi, T., Iwata, M., Keymeulen, D., Sakanashi, H., Murakawa, M., Kajitani, I., Takahashi, E., Toda, K., Salami, M., Kajihara, N. and Otsu, N.: Real-World Applications of Analog and Digital Evolvable Hardware, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol.3, pp.220–235 (1999).
- Murakawa, M., Yoshizawa, S., Adachi, T., Suzuki, S., Takasuka, K., Iwata, M. and Higuchi, T.: Analogue EHW Chip for Intermediate Frequency Filters, *Proc. International Conference on Evolvable Systems (ICES'98)*, pp.134–143 (1998).
- 村川正宏, 河西勇二, 安達敏男, 高須賀馨, 吉澤修治, 樋口哲也: 進化型アナログ LSI—遺伝的アルゴリズムによる製造誤差への適応, *電気学会論文誌*, Vol.C121, pp.134–141 (2001).
- Holland, J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press (1975).
- Archer, J.W., Granlund, J. and Mauzy, R.E.: A Broad-Band UHF Mixer Exhibiting High Image Rejection over a Multidecade Baseband Frequency Range, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.SC-16, pp.385–392 (1981).
- Minakawa, A. and Tokumitsu, T.: A 3–7 GHz Wide-Band Monolithic Image-Rejection Mixer on a Single-Chip, *IEICE Trans. Electron*, Vol.E-76-C, pp.955–960 (1993).
- Baumberger, W.: A Single-Chip Image Rejecting Receiver for the 2.44 GHz Band Using Commercial GaAs-MESFET-Technology, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.29, pp.1244–1249 (1994).
- Rudell, J.C., Ou, J.J., Cho, T.B., Chien, G., Rianti, F.B., Weldon, J.A. and Gray, P.R.: A 1.9 GHz Wide-Band IF Double Conversion CMOS Receiver for Cordless Applications, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.32, pp.2071–2088 (1997).

(平成 14 年 2 月 4 日受付)

(平成 14 年 4 月 10 日再受付)

(平成 14 年 5 月 15 日採録)



河西 勇二

昭和 38 年生。昭和 62 年筑波大学工学研究科にて工学修士(物質工学)。同博士後期課程を経て、昭和 63 年電子技術総合研究所入所。現在独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。高速電子デバイスの作製と評価の研究に従事。平成 11 年から遺伝的アルゴリズムの応用に関する研究に従事。電気学会、応用物理学会、日本太陽エネルギー学会各会員。平成 13 年電気学会電子・情報・システム部門ミレニアム最優秀論文賞受賞。



坂無 英徳(正会員)

昭和 44 年生。平成 8 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。平成 8 年から平成 10 年まで日本学術振興会特別研究員。平成 10 年工業技術院電子技術総合研究所に入所。現在、独立行政法人産業技術総合研究所研究員。人工知能(特に進化的計算および進化型ハードウェア)、データ圧縮、アナログ LSI の調整技術等に関する研究に従事。



高橋 栄一(正会員)

昭和 38 年生．平成 5 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了．同年通産省電子技術総合研究所に入所．実時間処理および並列計算機アーキテクチャの研究に

従事．平成 12 年同研究所の組織変更にもない，独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員．同年 MIRAI プロジェクト回路システム構成グループのサブグループリーダとして，適応型デジタル回路構成法の研究に従事．博士(工学)．電子情報通信学会，IEEE 各会員．



樋口 哲也

昭和 57 年慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了．工学博士．昭和 58 年電子技術総合研究所入所．平成 2 年から 3 年カーネギーメロン大客員研究員．筑波大学連携大学院

教授兼任．進化型ハードウェア，遺伝的アルゴリズムの研究に従事．第 25 回市村学術賞，電気学会ミレニアム論文賞等受賞．現在，産業技術総合研究所次世代半導体研究センター回路システムグループ長(MIRAI プロジェクト)．



村川 正宏

昭和 47 年生．平成 11 年東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻博士課程修了．同年電子技術総合研究所入所，現在独立行政法人産業技術総合研究所研究員．遺伝的アル

ゴリズム，ニューラルネットワーク，適応型ハードウェアの研究に従事．博士(工学)．平成 11 年第 2 回進化システム国際会議最優秀論文賞，平成 12 年度つくば奨励賞若手研究者部門，平成 13 年電気学会電子・情報・システム部門ミレニアム最優秀論文賞各受賞．電気学会会員．