

氏名	タ トアン タン TATUAN THANH
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成25年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程電気・通信工学専攻)
学位論文題目	60GHz 帯高速無線通信アレーアンテナ用自律ビームフォーミングシステムの研究
指導教員	東北大学教授 末松 憲治
論文審査委員	主査 東北大学教授 末松 憲治 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学教授 加藤 修三 東北大学准教授 亀田 卓

## 論文内容要旨

### 第1章: 序論

我々はディペンダブルエアという無線通信システムを提案している. このディペンダブルエアシステムでは複数の通信方式を統一し, 状況に応じて切り替えることで「いつでもどこでもどんな情報量でも」通信可能にする. 利用する通信方式は以下の3つを想定する.

1. 広域系 700MHz: km 級の通信距離, 100Mbps の通信速度のシステムで「いつでもどこでも」の通信を提供
2. 中域系 5GHz: 100m 級の通信距離, 数百 Mbps の通信速度のシステムでユーザが集中する場所に配置し, ユーザの通信速度とシステム全体のスループットの向上を提供
3. 狭域系 60GHz: 10m 級の通信距離, 2Gbps の通信速度のシステムでユーザが混雑する場所に配置し, 更なる高速通信を提供

本論文は3番の狭域系 60GHz の実現を目標とする. 本論文で想定する狭域系 60GHz は従来の WPAN やキオスクモデルなどの屋内環境に加えて屋外環境にも適用することを想定し, ユーザが混雑する状況を想定する.

狭域系 60GHz システムを実現するために, 以下の技術が必要である.

1. アレーアンテナモジュール
2. アレーアンテナ制御技術
3. Si-CMOS による送受信 RFIC

本論文の第2章ではアレーアンテナの制御技術について, 低消費電力で小型端末に実装可能なアレーアンテナの自律ビームフォーミング方式を提案する. 第3章では校正不要な5ビットベースバンド移相器の構造を提案する. そして, 提案した5ビットベースバンド移相器を用いて, Si-CMOS のビームフォーミング用受信 RFIC を試作・評価した. その結果, Si-CMOS によるビームフォーミング用 RFIC が実現可能であることを示す. 第4章では低消費電力で高性能な Si-CMOS RFIC を用いた3D 構造アレーアンテナモジュールの設計について説明する.

### 第2章: アレーアンテナ用低域ループ制御自律 BF 方式

目標の狭域系 60GHz システムではユーザが混雑した環境で利用することを想定している. この環境ではユーザの移動端末とホスト間に遮断物が多く, 通信可能な時間は短く, 数 msec と想定する. この数 msec でアレーアンテナの制御を行い, ビーム形成と通信する必要がある. 従来のアレーアンテナ制御では高速に制御可能な方法はデジタルビームフォーミングによる自律ビーム形成である. この方法はすべてのアンテナからの信号をベースバンドにダウンコンバージョンし, デジタル化する. そしてデジタル領域で計算によりビーム形成を行う. そのため広帯域信号を扱う 60GHz 通信では高速かつ高精度な ADC が多数必要であり, 消費電力が大きくなる. 従って小型端末に適用が困難である. ここで低域ループ制御自律ビームフォーミング方式を提案する. 提案した方式の概略は図1に示す.

本提案では, ビームフォーミング制御のために従来と同様に全てのアンテナの信号を扱うが信号はフル帯域ではなく低域成分のみ利用する. 従ってアンテナ数に比例した従来の高速 ADC は低速に置き換えることが可能になり, 低消費電力になる. 信号の復調はアナログ領域で行う事により, 復調用高速 ADC の数はアレーアンテナの素子数に依存せず2個で済む.

本提案をシミュレーションによりビームフォーミング制御可能であることを確認した. また, 制御時間は式 (1) のように導出した.

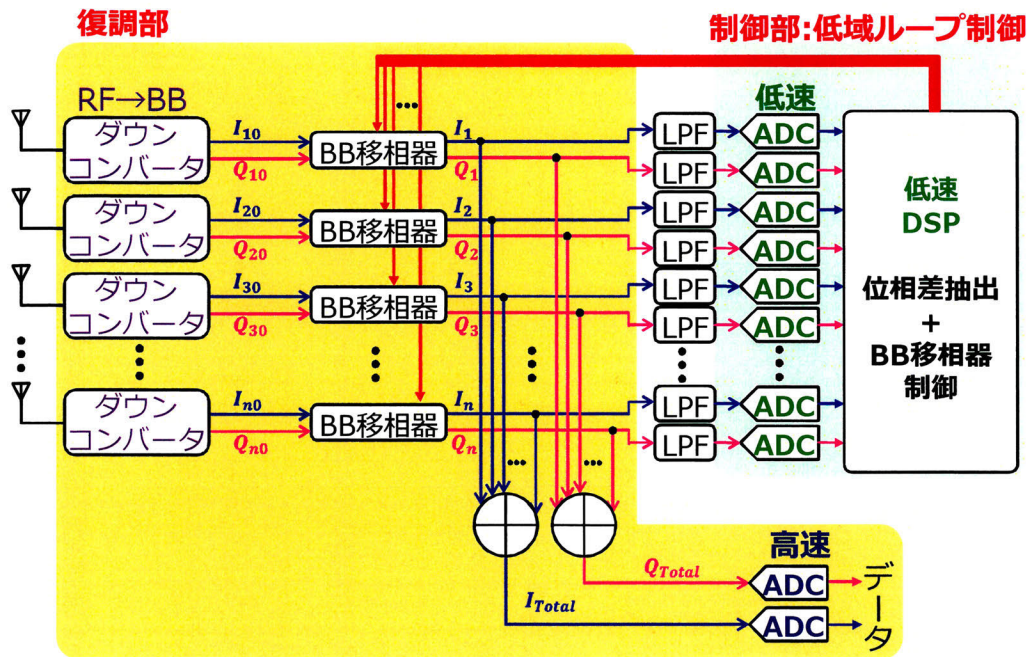


図 1. 提案する低域ループ制御自律ビームフォーミングシステム.

$$T = \frac{1 + 2SNR_0}{2B_{LPF}SNR_0^2 \sin^2 \frac{\sqrt{2}\varepsilon}{3}} \quad (1)$$

ここでTは制御時間,  $\varepsilon$  は位相制御精度,  $SNR_0$  は信号のSNR,  $B_{LPF}$  は制御ループのローパスフィルタの帯域である. シミュレーションと導出した式は一致することが分かった.

更にビームフォーミングは初期ビーム形成とビーム追従に分けられる. 初期ビーム形成ではパイロット信号が送られて, 制御時間 T は LPF に依存せず一定である. 即ち従来のデジタルビームフォーミング方式と同等時間である. 狭域系の想定を利用して計算した結果, 初期ビーム形成に要する時間は  $4.77\mu\text{sec}$  である. ビーム追従時間は LPF の帯域と逆比例関係があり, 帯域を狭めれば追従時間が小さくなる. 信号のベースバンド帯域幅の 86.4 分の 1 に相当する 10MHz の LPF を利用した時, 追従時間は  $29.2\mu\text{sec}$  と短く, 手持ちデバイスではビーム追従可能であることが分かった.

### 第3章: 自律 BF 用 60GHz 帯受信 RFIC

第2章で提案した方式では RFIC において信号をベースバンドにダウンコンバージョンし移相する. 従来ベースバンド移相器は利得可変増幅器を利用して構成する高ビット移相器とスイッチを用いて構成した 2 ビット移相器が提案された. ここで利得固定増幅器を用いて 5 ビットベースバンド移相器を提案する. 提案構成は図2に示す.

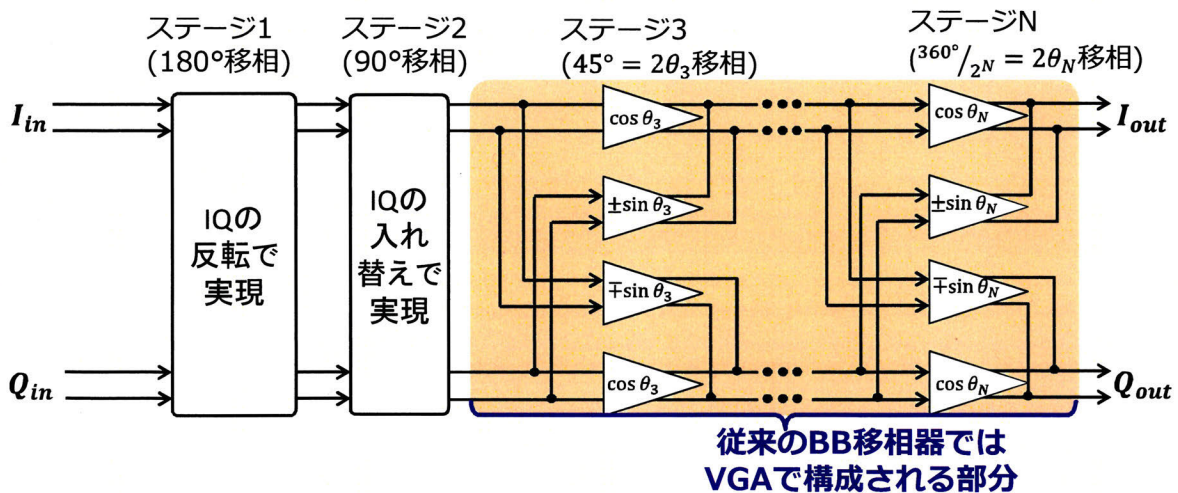


図 2. 提案ベースバンド移相器の構成.



提案の移相器のポイントは以下の3つである。

- ① Nビット移相器をN 移相ステージに分割し、各移相ステージは固定利得増幅器で構成する。
- ② 各ステージは固定移相量をプラスまたはマイナス方向とし、プラスとマイナスはスイッチで実現する。
- ③ カレントミラー構成を採用する。

ステージ  $i$  ( $i=3,4,\dots$ ) は  $+\theta_i$  又は  $-\theta_i$  を移相する。符号の切り替えはスイッチを利用する。理論上各ステージの位相誤差と利得変動はない。更にカレントミラー構成を採用することによりプロセスバラツキの影響と温度の変化の影響を受けにくく、校正不要で動作可能である。

試作した5ビットBB 移相器は図3に示す。複数ICを測定した結果、DC-1.08 GHz 帯域では位相誤差のrms 値は $2.5^\circ$  以下、利得変動のrms 値は0.42 dB 以下を得られ、校正不要で動作可能である事が分かる。

提案した5ビット移相器を用いてビームフォーミング用受信RFICを試作した。作成したRFICの写真は図4に示す。試作したRFICの3 dB 帯域は60.48 GHz と62.64 GHz を中心にしたチャンネルで、それぞれ1.9 GHz と1.6 GHz であった。また、1 Gbps QPSK 信号を復調する際のEVM は、-17.3dB であり、1 Gbps QPSK 信号の復調が可能である。

従って、Si-CMOS で校正不要な5 ビット位相制御可能BF 用RFIC を実現できた。

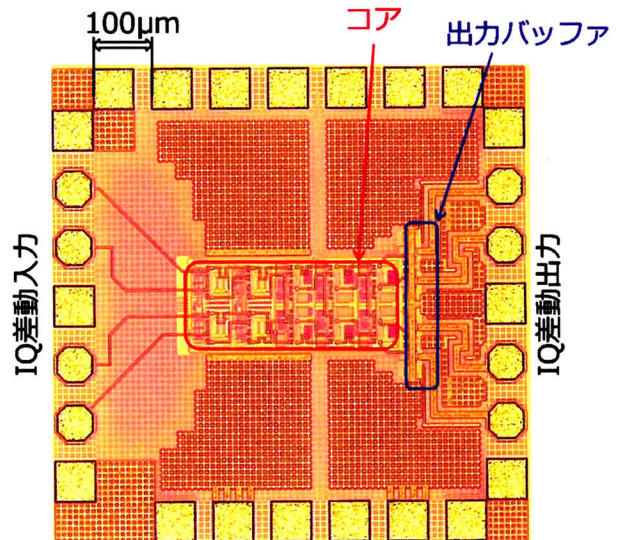


図 3. 試作した5ビットベースバンド移相器。

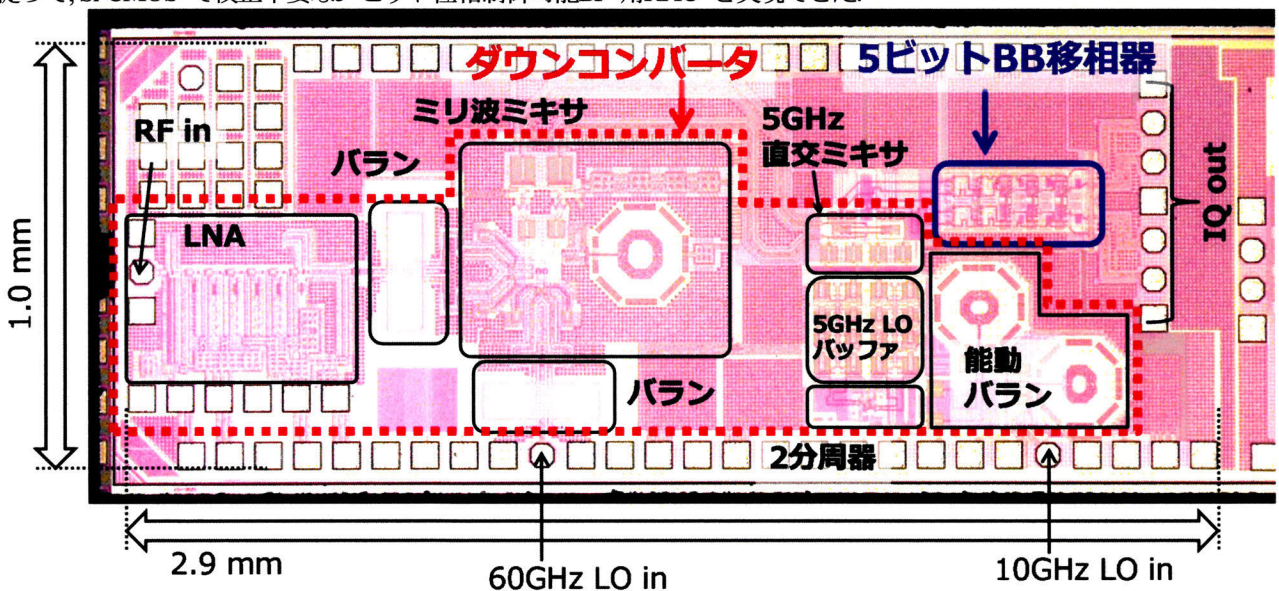


図 4. 試作したRFIC。

#### 第4章: 60GHz 通信用受信アレーアンテナモジュール

アレーアンテナモジュールとはビームフォーミングを実現するためのものである。アレーアンテナモジュールの構成はアレーアンテナ、RFIC とそのRFIC の入出力回路からなる。当研究室の吉田氏は3D-SiP 技術を用いて、 $2 \times 4$  素子アレーアンテナを提案した。本章はこのアレーアンテナを用いて、RFICの実装を考慮し、アレーアンテナモジュールを設計、試作した。設計したモジュールの構成は以下のようになる。

1. 基板を5枚積層した3D構造、銅ボール接続で積層
2. 素子アンテナ、RFIC: 基板1と5に実装。1素子アンテナにRFIC1個と接続。

各素子アンテナにRFIC1個を実装することでアレーアンテナの設計自由度を上げることが可能となる。従来のビームフォーミング用RFICではRFIC1個に対して複数アンテナと接続する構成が用いられてきた。この構成ではアレーアンテナの素子数やアンテナ配置はRFICの設計によって制限される。本章の構成ではアレーアンテナの素子数はRFICに制限されない。またアンテナ配置として、同一基板に配置される素子アンテナの間隔の最少値のみがRFICの実装に制限され



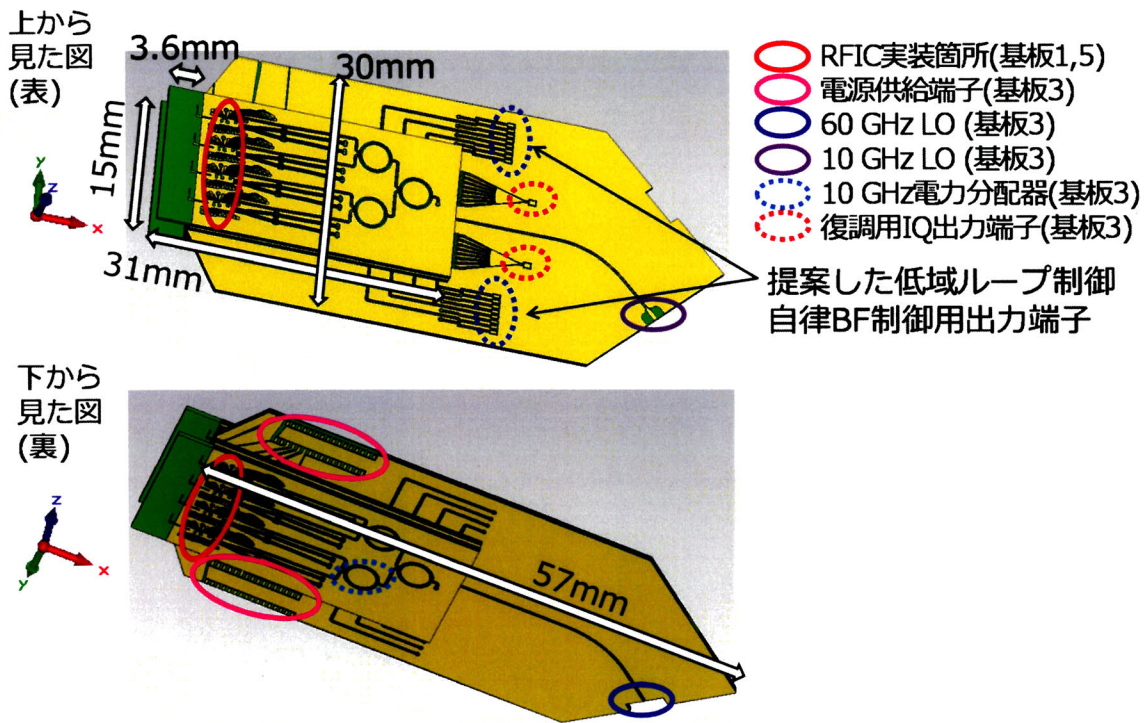


図 5. 設計したアレーアンテナモジュール.

る. 設計したアレーアンテナモジュールは図5に示す. 試作したRFICを用いて設計したアレーアンテナモジュールは10 m の距離において,  $2.34 \text{ sr}$  の立体角のカバレッジエリアを持つ通信が実現可能である. そして検証用1×4 と2×4 アレーアンテナモジュールを試作した. 検証用1×4アレーアンテナモジュールの写真は図6に示す. 試作した結果, 実装歩留りの課題があるが各素子アンテナにRFIC を実装する3D 構造アレーアンテナモジュールの実現性を示した.

#### 第5章. 結論

本論文では60 GHz 帯高速無線通信アレーアンテナ用自律ビームフォーミングシステムについての検討を行った. 第2章では低消費電力で小型端末に適用可能な低域ループ自律ビームフォーミング制御方法を提案した. 第3章では校正不要な5ビットベースバンド移相器の構成を提案した. 提案した5ビットベースバンド移相器を用いてビームフォーミング用受信RFICを作成し, 良好な結果を得られた. 4章では5枚の基板を積層した3D構造アレーアンテナモジュールを設計し, 試作した. 試作したモジュールはIC実装歩留りの課題があるものの実装する3D 構造アレーアンテナモジュールの実現性を示した.

#### 今後の展望

- アンテナモジュールの完成: 現時点のRFIC の実装歩留まりが悪く, アンテナモジュールの実現の障害となる. 実装の歩留まりの改善が必要である.
- 送信RFIC の開発: 送信RFIC を開発することで送信を可能にし, 初めて通信システムの構築ができる.
- アンテナモジュールのカバレッジエリアの拡大: 本論文で検討したアレーアンテナは2次元に配置されたアレーであり, 全空間の一部しかカバー出来ない構造である. これらのアレーを複数用いて, 全空間にビームを制御可能にすることが必要であると考えられる.

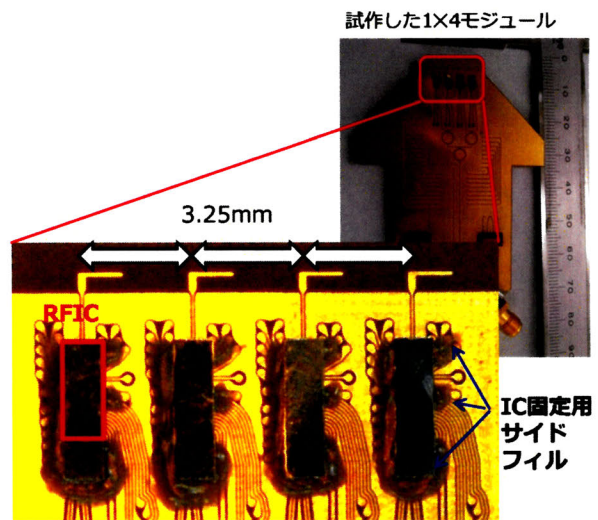


図 6. 試作した1×4アレーアンテナモジュール.

# 論文審査結果の要旨

超ブロードバンド通信の実現を目指し、小型・低コストな 60 GHz 帯無線通信端末の高性能化が求められている。この端末では送信電力が制限されているために高利得特性、並びに移動可能とするためにビームステアリング特性が必須である。本論文は、駅のプラットフォーム上のように、多数の人が移動しながら高速な無線通信を行う環境で必要とされる高速なビームトラッキングが可能な高速無線通信アレーアンテナ用自律ビームフォーミングシステムの実現を目指し、ビームフォーミング方式の提案と、ビームフォーミング用高周波 (RF) IC およびアンテナモジュールの研究を行った結果をまとめたものであり、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、高速なビームトラッキングが可能な自律制御ビームフォーミング方式として、低域ループ制御自律ビームフォーミング方式を提案している。高速な復調部と高精度な制御部を分離し、制御部では広帯域な受信信号のうち低域成分のみを取り出し位相差を抽出するとともに、ビーム制御を行うことにより、高精度な制御部を低速で動作可能としている。また、広帯域な受信信号を予めアナログ領域において移相・同相合成することが可能となり、1 つの復調系で復調することができる。8 素子アレーアンテナを用いた 60 GHz 帯広帯域無線通信用受信機に適用した場合、従来のデジタルビームフォーミング方式に比べて消費電力を 1/8 に、制御部の信号処理速度を 1/100 にそれぞれ低減可能であることを示している。これらの成果は、次世代のミリ波広帯域通信端末に必要な高速ビームトラッキング方式の実現性を高めたもので、極めて重要な知見である。

第 3 章では、第 2 章で提案した自律ビームフォーミング方式の受信機用に、60 GHz 帯のミリ波受信信号をベースバンド信号に変換するとともに、通過位相を調整することができる RFIC を検討している。通過位相を高精度に調整する 5 bit の移相器を固定利得増幅器マトリックスで実現することで、校正不要な構成としている。IC 試作の結果、5 bit 移相器に求められる  $5.625^\circ$  以下の移相誤差を大幅に下回る  $1.5^\circ$  r.m.s. の移相誤差が得られている。また、1 Gbps の広帯域信号を受信できる広帯域特性も実測により確認されている。これらは、ビームフォーミング可能なミリ波広帯域無線通信端末の小型化を実証した成果として高く評価される。

第 4 章では、第 3 章で検討した RFIC を各素子アンテナに接続した 3 次元実装アレーアンテナモジュールについて検討している。シミュレーションにより、8 素子アレーアンテナモジュールは、ビームステアリングを行いながら 10 m 以上の距離の通信が可能であることを示している。また、RFIC を実装したアンテナモジュールを試作し、素子アンテナ間で位相合成が可能であることを確認している。提案するアンテナモジュールにより、第 2 章で提案した自律ビームフォーミング方式の受信機を実現することが可能であり、これらの成果は、極めて高く評価される。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、高速なビームステアリングを可能とするミリ波広帯域無線通信端末の自律ビームフォーミング方式を提案し、これに必要な RFIC およびアンテナモジュールの実現性を示したものであり、電気・通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。