

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04171

研究課題名(和文) オンチップ低消費電力注入同期型アクティブセルを用いた150GHzアレーアンテナ

研究課題名(英文) Low Power On-chip 150GHz Array Antenna with Injection-Locked Active Cell

研究代表者

本良 瑞樹 (Motoyoshi, Mizuki)

静岡理工科大学・理工学部・准教授

研究者番号：40736906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：150GHz帯におけるアクティブアンテナユニットを実現し、これをアレー化することでアンテナアレーとしての動作を検証するための検討を行った。

た。(1)低消費電力な発振器を米国GF社の45nm SOI-CMOSを用い試作し148GHz発振器を消費電力1.3mWで実現した。(2)小型なアクティブアンテナモジュールを実現するため、発振器の共振器とアンテナを共用することを提案し、148GHz送信機をアンテナ混みでチップサイズは0.3mm×0.24mmで実現した。(3)提案するアクティブモジュールを2×2個配列し、注入同期信号により2つ以上のモジュールが同期できることを確認した。消費電力は1.3mWであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線通信は現代社会において必要不可欠なものとなっており多くの通信が無線化されている。ミリ波帯での高速無線通信の回路検討は広くなされており、60GHz帯は無線LANなどでも利用されるようになってきた。短ミリ波帯は今後の無線通信において広く使われていく領域と考えられる。また、第5世代携帯電話での検討で見られるようにMassive-MIMOなどアレーアンテナを用いた構成は必須になっていくと考えられる。短ミリ波領域ではローカル信号周波数も非常に高くなり従来型のアレー回路は構成が困難であると考えられ、本研究成果は、短ミリ波領域におけるアレーアンテナシステムの実現に寄与できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We realized an active antenna unit in the 150-GHz band, and studied how to verify the operation as an antenna array by converting it into an array.

The following are the results of this study. (1) A prototype low-power oscillator was fabricated using GF's 45nm SOI-CMOS, and a 148GHz oscillator was realized with a power consumption of 1.3mW. (2) To realize a compact active antenna module, we proposed to share the resonator and antenna of the oscillator, and realized a 148-GHz transmitter with a chip size of 0.3 mm × 0.24 mm including the antenna. (3) We have arrayed the proposed active modules in a 2 × 2 configuration and confirmed that two or more modules can be synchronized by injected synchronous signals. The power consumption was 1.3mW.

研究分野：無線通信

キーワード：短ミリ波 低消費電力 アクティブアレーアンテナ 発振器 注入同期

1. 研究開始当初の背景

シャノンの通信容量によると、通信容量の向上には帯域幅と信号雑音比(SNR)の改善が必要となる。プラチナバンドをはじめとした従来携帯電話網で使用されてきた周波数帯はそのほぼ全てが周波数割り当てされており、また利用する端末の台数からも帯域幅を拡大することが困難である。そのため、従来利用されてこなかった周波数帯の利用が必要とされている。また、無指向性アンテナを用いた無線通信では、アンテナを中心として全方向に電波が放射されるが、端末が受信する電波はその一部であり多くのエネルギーが無駄になる。そのため、端末における受信電力は大きく低下し SNR が非常に小さくなる。そこで、4G/5G では端末に向けて電波を集束し SNR の改善を行っている。これをビームフォーミングとよび、指向性アンテナを用いる必要がある。パラボラアンテナや八木アンテナなどの指向性アンテナではビームの方向を変えるのに物理的にアンテナを走査する必要があるため移動自由度を求める携帯電話では利用が困難である。そこで、アレーアンテナシステムが用いられる。これは複数のアンテナに位相を変えた信号を供給することで、空間における信号の強め合い弱め合いを用いて所望の方向に強い電波ビームを形成する手法である。その実現には、複数素子アンテナに給電する信号を生成する給電回路が必要となる。これらを背景として、ミリ波短ミリ波などの高い周波数の利用が検討されてきた。また、その周波数帯で動作できるアレーアンテナシステムの実現が求められてきた。

電波法における免許不要な空中線電力は図 1 に示すように制限されており、マイクロ波帯・ミリ波帯では大きく制限されている。一方で 150GHz 帯以上では制限が緩和されており大きな空中線電力が使用できる。また、アレーアンテナの素子間隔は一般的に $\lambda/2$ であり、 4×4 アレーであれば第 5 世代携帯電話で用いられる 28GHz 帯ではおよそ 20mm 角である。60GHz 帯で同じ面積で 8×8 アレーとなるのにたいして、150GHz 帯ではマイクロ波ミリ波に比べ波長が各段に短くなり 20×20 アレーが実現可能となるため、同じ面積でより高性能高精度なアレーアンテナが実現できる。

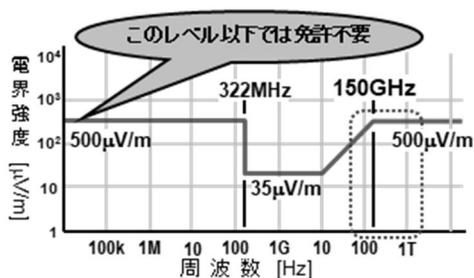


図 1：免許不要な空中線電力

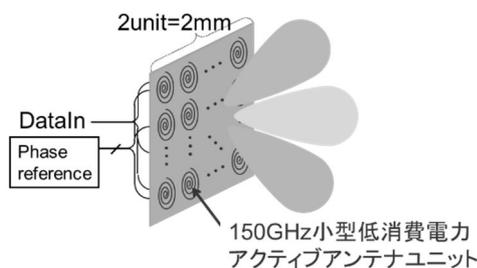


図 2：実現するアクティブアンテナユニット

一方でアレーアンテナ素子が利用できる面積は 1mm 角となり、フロントエンド部の小型化が必要となる。また、非常に高い周波数を用いるため通信機のローカル信号の周波数も高くなるため、ローカル信号パスの損失が無視できなくなると共に、アレーアンテナ素子間隔($\lambda/2$)が 1mm となりフロントエンド部の小型化が重要となる。ここで、アンテナ素子あたり 1mm 角、1mW のアクティブアンテナユニットが実現できれば、短ミリ波帯でのアレーアンテナが実現でき小型で高速通信が可能な無線機につながる。

図 3(a)に一般的な無線機のアナログフロントエンドを示す。アンテナの直近に増幅器とミキサがあり、ローカル信号が供給されている。素子アンテナの位相を制御するためローカル信号は素子毎に与える構成となっている。マイクロ波帯などではローカル信号は数十 GHz 程度に

とどまるが、短ミリ波などでは 100GHz を超えるものとなる。そのため、ローカルパスの線路損失は大きいものとなり、ローカル信号同士のカップリングも無視できなくなり、ローカル分配回路がサイズとしても消費電力としても非常に大きくなる。そこで高い周波数用のデバイスでは、図 3(b)に示すようにローカル信号源は低い周波数で動作させフロントエンド部にある逡倍器にてミキサのローカル信号を生成する構成が用いられる。逡倍器までは低い周波数で動作するためローカル分配回路などの損失は低く抑えられるが、逡倍器は大きな挿入損をもつため、逡倍器を駆動するためローカル信号源から大きな電力を送る必要がある。アレーアンテナでは複数の逡倍器が必要となるため、ローカル信号源には更に大きな電力が必要とされ、フロントエンドの消費電力は(a)の構成同様大きいものとなる。また、増幅器やミキサ、逡倍器などのデバイスは集積回路上においても大きく、1 ユニットでも数ミリ角のチップ面積が必要となる。そのため 1mm 角サイズしか素子アンテナが利用できない 150GHz 帯など高い周波数においては構成が困難となる。アレーアンテナの実現はアンテナ利得の向上、電波の干渉低減など無線通信には欠かせない技術の 1 つとなっており、短ミリ波帯においても重要となる。

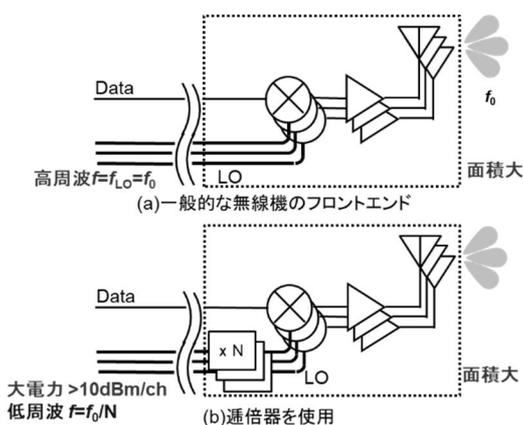


図 3：アレーアンテナ用アナログフロントエンドの従来構成

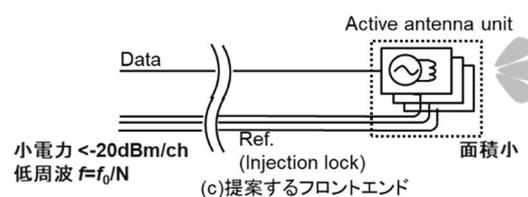


図 4：提案するアレーアンテナ用フロントエンド

2. 研究の目的

本研究開発では図 4 に示す、短ミリ波におけるアレーアンテナを実現するためのアクティブアンテナユニットを提案する。提案構成において、局部発振器は素子アンテナ毎に存在し、アレーアンテナとしての同期は各ユニットに外部から供給されるリファレンス信号で実現する。ローカル信号はアンテナ直下で生成されるため、大電力をユニット外から供給する必要がない。また、リファレンス信号として 10GHz 程度の CW 波を想定し、ローカル信号より充分低い周波数の信号を用いるためローカル分配回路を簡易に、小さくすることができる。

これを実現するには、(1)低消費電力な発振器、(2)小型なアクティブアンテナ、(3)外部からの同期が可能なアクティブアンテナユニットが必要になる。課題(1)~(3)を解決することで、本研究開発では、小形低消費電力送信機を、注入同期により同期させアレー化することで、150GHz 帯において 1mm 角、mW 級のアクティブアンテナユニットアレーを実現する。

3. 研究の方法

- (1) 低消費電力発振器について検討してきた技術を 150GHz 帯発振器についても適用することで、サブミリワットでの短ミリ波発振器を実現する。
- (2) 共振器兼用アンテナを用いることで小形短ミリ波送信機を実現する。150GHz 帯などの短ミリ波領域においてはシリコン基板損失が大きくなり放射効率が 60GHz 帯より低下すると考え

と考えられる。短ミリ波領域ではインダクタによる共振器ではなく、伝送線路による低損失共振器が必要になると考えられる。電送線路を用いた共振器兼用アンテナの検討および SOI-CMOS プロセスなど高抵抗基板プロセスの利用を検討する。この結果を実際に発振器に適用することでアンテナ一体型のアクティブアンテナユニットとして 150GHz 帯においても実現する。(3) 各ユニットの同期はアレーアンテナの実現に不可欠である。課題(1)および(2)において検討する、150GHz 帯低消費電力発振器およびアンテナ共用共振器により小型で低消費電力なアクティブアンテナユニットを構成する。このアクティブアンテナユニット間の同期をとるために、発振器のバイアス制御に用いる MOSFET への注入同期現象を利用することを考える。

以上、本研究開発においては 150GHz といった短ミリ波での小型・低消費電力アクティブアンテナユニットの実現と、ユニットの同期によるアレーアンテナの検討を行う。

4. 研究成果

(1) 150GHz 帯低消費電力発振器として、共振器にはマイクロストリップラインを用いたリング状電送線路構造とし、クロスカップル構成を用いた。使用したプロセスは米国 GF 社の 45nm SOI-CMOS である。評価結果を図 5 に示す。設計周波数 150GHz に対して 148.5GHz での動作を確認した。消費電力は 1.3mW であった。

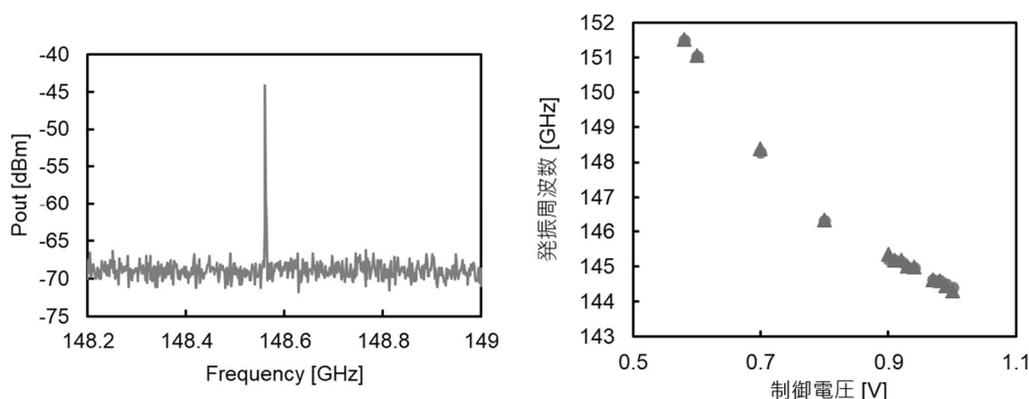


図 5：150GHz 帯低消費電力発振器評価結果

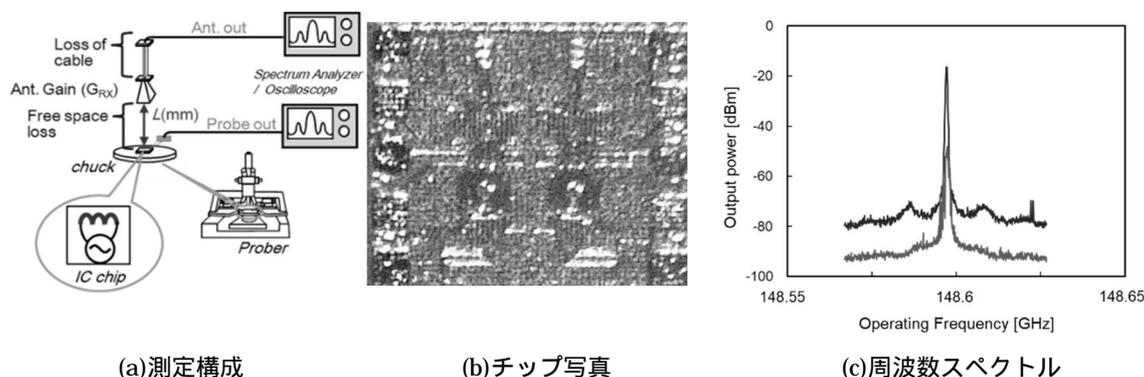


図 6：150GHz 帯共振器兼用アンテナ試作・評価結果

(2) 45nm SOI-CMOS プロセスを用いた共振器兼用アンテナについて検討した。アナログ用の最上位層のシックメタルを用いて伝送線路をリング状にした構造である。また、最下位層 (M1) については MSL 構造となるように、かつプロセスの密度ルールを満たせるようにスリット構造とした。図 6 (a) に測定構成を、(b) に共振器兼用アンテナを成果(1)における発振器に適用した

結果を示す．発振器から高周波プローブ経由で測定する Probe out と，発振器からの放射波をホーンアンテナで受信する Ant. out を測定した．提案回路から Probe out と同じ信号が観測できており，共振器兼用アンテナが動作していることが確認できた．チップサイズは $0.3\text{mm} \times 0.24\text{mm}$ であった．

(3) 45nm SOI-CMOS プロセスを用いたアクティブアンテナ回路の回路図を図 7 に示す．回路は成果(1)で検討した低消費電力発振器に，成果(2)の共振器兼用アンテナを適用した回路をベースとした．発振周波数を同期するための注入同期回路を電源回路部に挿入してある．4つの提案アクティブアンテナ回路を 2×2 に配置し，それぞれのモジュールに注入同期信号と DC バイアスを供給したときの，2つのモジュールの動作状態の評価結果を図 8 に示す．図 8(a)に注入同期信号を印加しない場合の結果を示す．アクティブアンテナ回路はフリーラン状態となり出力信号が同期していない．図 8 (b)に注入同期信号として，7.25GHz の CW 信号を印加した結果を示す．2つのモジュールが同期しており，アレーとして動作することが確認できる．この時の消費電力は，1.3mW であった．

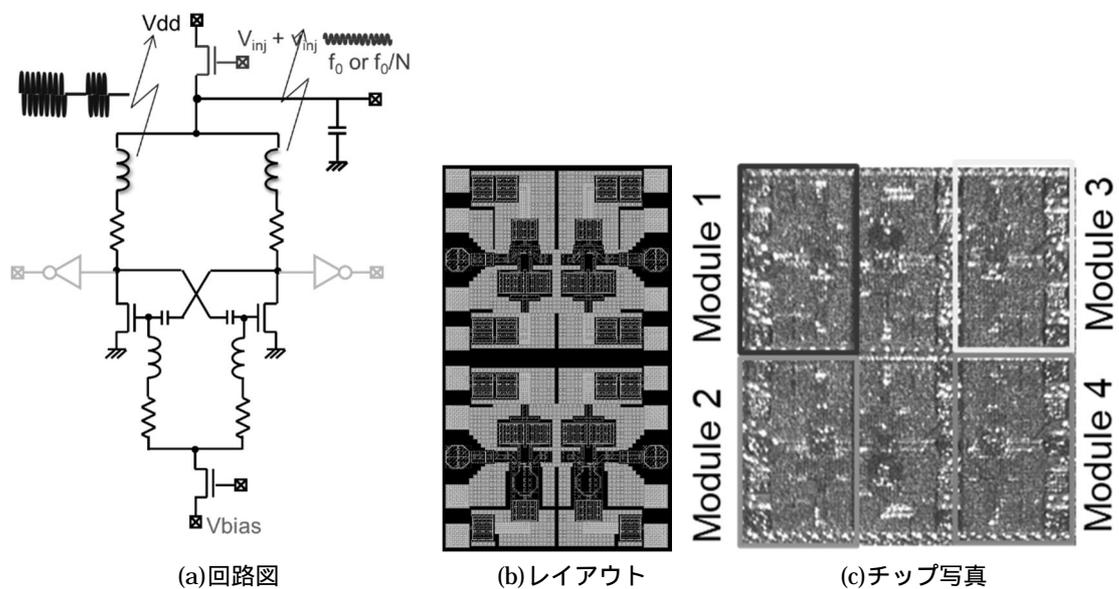


図 7：提案 150GHz 帯アクティブアンテナユニット

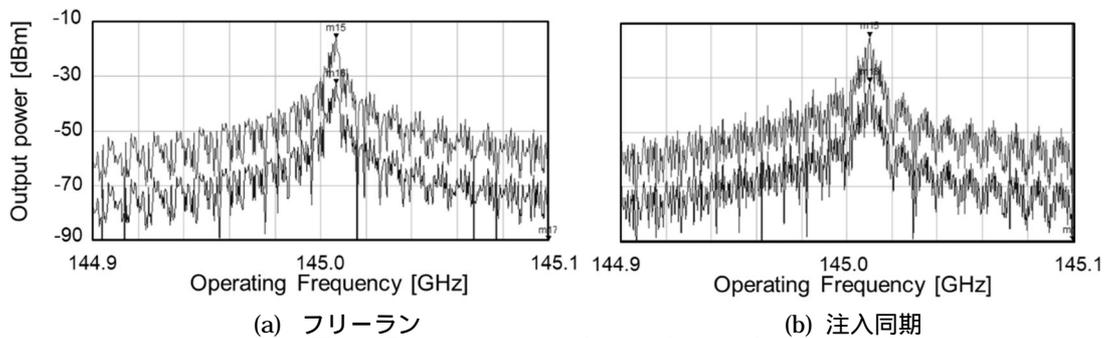


図 8：提案 150GHz 帯アクティブアンテナユニット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zhu Liyan, Shin Sang-Hee, Payapulli Roshan, Machii Taiki, Motoyoshi Mizuki, Suematsu Noriharu, Ridler Nick M., Lucyszyn Stepan	4. 巻 33
2. 論文標題 3-D Printed Rectangular Waveguide 123-129 GHz Packaging for Commercial CMOS RFICs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Microwave and Wireless Technology Letters	6. 最初と最後の頁 157 ~ 160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LMWT.2022.3220364	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
英国	Imperial College London		