

外 96-1

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

2 台のレーザ光源とフーリエ光学系を
ビーム形成回路に用いる
光制御アレーアンテナに関する研究

申 請 者

小西 善彦

Yoshihiko Konishi

1996年 4月

1. 本研究の目的

アクティブフェーズドアレーアンテナ (APAA) は、多数配列された素子アンテナの励振位相を可変移相器によって制御することで、ビーム走査／形成を電子的に行うアンテナである。APAAではアンテナを機械的に固定したままで高速な放射指向性の制御が可能となり、放射指向性の制御方法に大きな変化をもたらした。APAAはまずレーダ用として実用化されたが、衛星搭載用などの通信用アンテナへ適用する研究が近年盛んになっている。

衛星搭載用アンテナなどにAPAAを適用する場合には、可変移相器などにより構成されるビーム形成回路 (BFN) の大きさおよび重量の軽減や挿入損の低減、およびBFNの高速制御などが問題となる。これらを解決する方法として、フーリエ光学系と光ヘテロダイン検波を用い、光周波数領域での信号処理により各素子アンテナのマイクロ波励振振幅位相分布を生成、制御するアンテナ、すなわち光技術をBFNに応用する光制御アレーアンテナが提案された。この光制御アレーアンテナは可変移相器や電力合成分配器を各素子アンテナに搭載する必要がなく、BFNの小形軽量化が期待できる。また所要のアンテナ放射パターンを高速かつ容易に形成できる。しかし従来は応用例の提案や簡単な実験が行われただけであり、マイクロ波帯での実現性に関する検討は全く行われていなかった。

本研究の目的は、フーリエ光学系をBFNに用いる光制御アレーアンテナのマイクロ波帯での実現可能性を定量的に検討することにある。特に、発振周波数が異なる2台のレーザ光源を用い、光ヘテロダイン検波で差周波であるマイクロ波信号を取り出すことにより、マイクロ波帯だけでなくミリ波帯での動作も可能な2レーザ形式光制御アレーアンテナを提案し、その実現に必要な基礎資料を得ることである。

以下、本研究の内容について述べる。

2. フーリエ光学系を用いる光制御アレーアンテナのC/N₀特性およびサイドローブ特性

この章ではまず、フーリエ光学系を用いる光制御アレーアンテナとして、発振周波数差が所要のマイクロ波周波数に設定された2台のレーザ光源を用い、光ヘテロダイン検波で差周波であるマイクロ波信号を取り出す2レーザ形式光制御アレーアンテナを提案する。2レーザ形式はレーザ光源の発振周波数差を適宜設定することで動作周波数を容易に変えることができ、マイクロ波帯だけでなくミリ波帯での動作も可能であると考えられる。

次に衛星搭載用などの通信用アンテナへの適用を考慮し、従来より提案されている1レーザ形式と2レーザ形式の比較を行う。そして、両形式で実現できる搬送電力対雑音電力密度比C/N₀とレーザ光源の光出力との関係を計算により求める。その結果、同じC/N₀を得る場合には、2レーザ形式は1レーザ形式

に比べて光出力を10 dB以上小さくできることを示した。また、レーザ光源の光出力を10 dBmとするならば、アンテナから空間に放射されるマイクロ波信号のC/N₀として約70 dB・Hzが実現可能であることを示した。

更に1次元に単純化した光制御アレーアンテナを想定して、利得やビーム幅、サイドローブレベルといった放射特性を検討する。そして、参照光の振幅分布を振幅テーパの大きいガウス分布とすることで、衛星搭載用アンテナなどに必須な低サイドローブ特性を光制御アレーアンテナで実現可能であることを確認した。

3. 光制御アレーアンテナのイメージマスク開口径と励振分布との関係

2レーザ形式光制御アレーアンテナの実現可能性を確かめるためには、各素子アンテナのマイクロ波励振振幅位相分布を理論だけでなく、実験的にも検証する必要がある。この章では、フーリエ変換レンズ (FTレンズ) の光軸上に円形開口イメージマスクを配置した場合の素子アンテナ励振振幅位相分布とイメージマスク開口径との関係を理論的、実験的に検討する。さらに、実験で得られた励振分布を用いてアンテナ放射パターンを計算により求め、マスク開口径と放射パターン形状との関係を示す。

まず円形開口イメージマスクを用いる場合の素子アンテナ励振分布と放射指向性を解析的に表す。そして、光ファイバアレーの光ファイバ配列間隔および素子アンテナ配列間隔とイメージマスク開口径との関係を示している。次に、レーザダイオード励起Nd:YAGレーザを光源に用い、差周波数を1.54 GHzに設定した2レーザ形式実験系において、イメージマスク開口径を変化させた場合のマイクロ波励振振幅位相分布の測定を行う。そして、理論値にはほぼ一致する安定した励振分布が得られることを実証した。更に励振分布実測値を用いてアンテナ放射パターンを計算により評価した結果、励振分布の誤差によりサイドローブレベルは-25 dB程度しか得られないが、イメージマスク開口径に比例したメインビーム形状を有するアンテナ放射パターンが得られることを示した。

4. 光制御アレーアンテナのビーム走査特性

この章では、2レーザ形式光制御アレーアンテナにおけるビーム走査を意図して、円形開口イメージマスクをFTレンズの光軸から移動させた場合の各素子アンテナのマイクロ波励振分布とアンテナ放射パターンを理論的、実験的に検討する。そして、ビーム走査に必要な位相勾配を有する励振分布が得られることを明らかにし、イメージマスク移動量に比例したビーム走査が可能であることを示す。

まず円形開口イメージマスクをFTレンズの光軸から移動させた場合の励振分布表示式より、イメージマスクの移動量とアンテナ放射パターンのビーム走査角との関係を解析的に求めている。次に3章と同じ2レーザ形式実験系を用いてイメージマスク移動時のマイクロ波励振振幅位相分布の測定を行う。そして、ビー

ム走査に必要な、イメージマスク移動量に比例した位相勾配を有する励振位相分布が得られることを示した。更に3章と同様に、励振分布実測値を用いてアンテナ放射パターンを計算により評価した結果、イメージマスク移動量の設定誤差に注意すれば、イメージマスク移動量に対応するビーム走査角を2レーザ形式光制御アレーアンテナで実現できることを確認した。

5. 光ファイバアレーで励振を行う光制御アレーアンテナ

2レーザ形式光制御アレーアンテナでは、フーリエ変換光と参照光を光ファイバアレーで空間的にサンプリングし、各素子アンテナの励振信号を得る。そのため光ファイバアレーは重要なコンポーネントである。しかし、光ファイバアレーの構成法の検討や、光ファイバアレーを使用した場合の素子アンテナ励振分布やアンテナ放射パターンの検討は従来行われていない。この章では、平面状の光ファイバアレーを実際に組み込んだ2レーザ形式光制御アレーアンテナにおいて各素子アンテナのマイクロ波励振分布を実験的に検討する。更に、実験で得られた励振分布を用いてアンテナ放射パターンを計算により評価し、光ファイバアレーで励振を行う光制御アレーアンテナの実現可能性を示す。

光ファイバアレーの構成方法としては、マイクロレンズ付きシングルモード光ファイバを使用する場合と、シングルモード光ファイバをそのまま使用する場合の二つの方法が考えられる。ここでは、光軸合わせが容易な後者の方法により試作を行い、平面状の61素子光ファイバアレーを構成した。試作光ファイバアレーは素子配列平均値が $141\mu\text{m}$ のループ状配列であり、アレー外周部の透過損が中心部より9～14dB大きく、透過位相ばらつきが最大 63° ある透過特性となった。この光ファイバアレーを用いてマイクロ波励振分布の測定を行った結果、光ファイバによる透過損の違いを補正すれば、光ファイバアレーを用いた場合にも理論値に対応した励振分布が得られることを確認した。更に、励振分布実測値を用いてアンテナ放射パターンを評価した結果、計算値に対応する軸対称な放射パターンが実現できることを確認した。

6. 結論

以上、2台のレーザ光源とフーリエ光学系をビーム形成回路に用いる2レーザ形式光制御アレーアンテナの研究成果について述べた。衛星搭載用をはじめとする通信用アンテナやミリ波用アンテナに小形軽量で広帯域、低損失かつ高機能なアクティブフェーズドアレーアンテナの実現要求がますます高まっている。これらのアレーアンテナに対して、今後、本研究の成果が生かされるものとする。