

機関番号：53901

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560408

研究課題名（和文） 防災用可搬型高画質ミリ波カメラの開発

研究課題名（英文） Study on Portable Devices for Active Millimeter-wave Imaging

研究代表者

安藤 浩哉（ANDOH HIROYA）

豊田工業高等専門学校・情報工学科・教授

研究者番号：30212674

研究成果の概要（和文）：小型で高画質なミリ波カメラを実現するために、照射電磁波（通常のカメラのフラッシュ光に相当）が被写体に当たり返ってくる電波を検出する必要があるが、そのために必要なミリ波帯偏波分離器（偏光メガネに相当）を詳細に考察・設計した。また、1/4波長の伝送線路で構成される高周波回路の小型化に関する考察・実験を行ない、従来よりも面積比で30%小さい高周波コンポーネントを設計・製作し、その動作を確認した。

研究成果の概要（英文）：A waveguide ortho-mode transducer with branch-lines, which is needed for for active millimeter-wave imaging, has been designed. Small circular 3-dB branch-line coupler with stubs has also been designed and the operation is checked experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：マイクロ波、信号処理

科研費の分科・細目：計測工学

キーワード：ミリ波カメラ、偏波分離器、スタブ、小型化

1. 研究開始当初の背景

セキュリティや防災の観点で、手軽な可視光以外のイメージング装置に対する社会からの要請が高く、特に、

- 建物火災やトンネル内火災などの高温の炎のもとでの車両や人体などの認識
- 降雨降雪下での遠景観測、冬山での遭難時の悪天候での人体などの認識
- 衣服の下に隠し持った武器・爆弾の検知などの分野では、ミリ波カメラによるイメージング技術が注目されていた。

人や動物などをはじめ温度を有するすべ

ての物体は、黒体輻射としてミリ波帯からサブミリ波帯の電波や遠赤外線・赤外線の電磁波を多く放出しており、その電磁波のエネルギーは、ミリ波アンテナ、増幅器、ショットキーダイオード検波器などを組み合わせて構成されている受信機で観測して、温度に換算して0.1度の分解能で高感度に検出することが可能である。海外では、セキュリティ対策としてミリ波イメージング技術を活用することが検討され、鉄道駅や空港の乗客監視システムなどで試験運用が始まっていた。また、防災面では、例えば、腰に手を添えた人

物が炎の向こう側にいる場合、可視光カメラや赤外線カメラでは炎が邪魔をしてその姿を確認することができないが、ミリ波カメラでは腰に手を添えた姿を確認することが出来ることが分かっていた。

しかしながら、セキュリティや防災の面で用いるには、当初のミリ波カメラは、

- 観察するミリ波が微弱で周波数帯域が狭く、物体を詳細に認識するための情報量が乏しい。
- アンテナ等を含むシステム全体が大きくて火災現場や遭難現場への運搬に適していない。

などの問題を含んでいた。

2. 研究の目的

従来のミリ波カメラのミリ波イメージング技術は、主に、物体そのものから発生する電磁波を検出し画像化する受動型（パッシブ）イメージングであった。そこで、本研究では、ミリ波カメラに広帯域な発光機能（周波数掃引ができるミリ波送信機能）と偏波分離機能を持たせることで、受動型（パッシブ）イメージングと（アクティブ）イメージングを併用しながら、これら2つのイメージングを適切に処理して、より小型で高精度な広帯域ミリ波カメラを実現することを目的にした。

3. 研究の方法

駆動系を備えたアンテナを介して受信したミリ波信号を、局部発振器から得られた信号と方向性結合器で結合させ、数100MHz程度の中間周波数に落とした信号を観測するが、特に、似た温度をもつ物体を識別し鮮明な画像（二次元イメージ）を得るには、周波数掃引のあるミリ波照射下で偏波面を変化させることが有効であると考え、ミリ波帯で利用できるブランチャライン型偏波分離器の設計を優先して行った。

また、カメラの小型化には、高周波回路基板の小型化が有効であると考え、スタブ付伝送線路と二次元伝送平面の2つのアプローチにより回路理論的に高周波コンポーネントの設計を行った。

4. 研究成果

(1) 「偏波分離」に関する研究成果

電磁波の導波管内でのモードを分離して偏波面の向きの違いで電磁波を分ける部品が偏波分離器であるが、フィンラインやセプタムと呼ばれる部品を必要とせず部品点数が少ないブランチャライン偏波分離器について詳細に考察・設計した。

このブランチャライン偏波分離器は、主伝送

線路に入力されたある偏波面をもつ電磁波が全て副伝送線路に伝わる性質を利用しており、ある偏波面の電磁波に対して主伝送線路と副伝送線路がブランチャラインを介して0dBでカップリングしている。

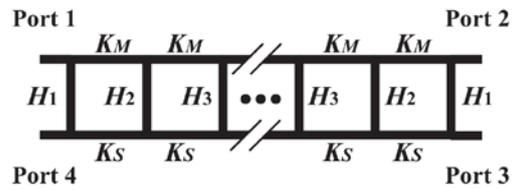


図1 ブランチャラインカップラの構造

図のようなブランチャラインカップラを考える。特に、主伝送線路（特性インピーダンス K_M ）と副伝送線路（特性インピーダンスが K_S ）が3本のブランチャラインで結合されているカップラで0dBのカップリングを実現するためには、3本のブランチャラインの特性インピーダンス H_1, H_2, H_3 を、

$$H_1 = H_2 = \sqrt{K_M K_S}$$

とする必要がある。また、4本のブランチャラインで結合されているカップラで0dBのカップリングを実現するためには、4本のブランチャラインの特性インピーダンス H_1, H_2, H_3, H_4 を、

$$H_1 = \frac{\sqrt{K_M K_S}}{2}, \quad H_2 = \sqrt{K_M K_S}$$

とする必要がある。しかしながら、3本の場合とは異なり、 $H_1=H_2$ という条件ではない。

さらに、5本のブランチャラインで結合されているカップラで0dBのカップリングを実現することを考えると、5本のブランチャラインの特性インピーダンスを H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 とする時、

$$H_1 = \frac{K_M K_S - H_2 \sqrt{K_M K_S}}{H_2},$$

$$H_3 = \frac{2H_2 K_M K_S - K_M K_S \sqrt{K_M K_S}}{H_2^2}$$

なる関係式が求まり、 $H_1=H_2=H_3$ という条件では、

$$H_1 = H_2 = H_3 = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \sqrt{K_M K_S}$$

が求まる。

以上の結果をもとに、主伝送線路（特性インピーダンス K_M ）と副伝送線路（特性インピーダンスが K_S ）が、 N 本（ N は奇数）のブランチャライン（特性インピーダンス H ）で結合されているカップラで0dBのカップリングを実現するための条件を求めたところ、

$$H = k \sqrt{K_M K_S}$$

が成り立つことが分かった。ここで、 k は奇

数 N に依存する定数で、次の表の値をもつ。

表 $k = H / (K_M K_S)^{1/2}$ の値

N	3	5	7	9	11	13	15
$\frac{H}{\sqrt{K_M K_S}}$	1.00	0.618	0.445	0.347	0.285	0.241	0.209
17	19	21	23	25	27	29	31
0.185	0.165	0.150	0.137	0.126	0.116	0.108	0.101
35	41	45	51	55	61	65	
0.0899	0.0767	0.0699	0.0617	0.0573	0.0515	0.0485	
71	75	81	85	91	95	101	
0.0443	0.0419	0.0389	0.0371	0.0347	0.0331	0.0313	

これらの関係式と表に基づいて、 $N=13$ 、 $K_S/K_M=0.25$ 、 $H/K_M=0.121$ の場合の 0dB ブランチラインカップラの周波数特性を回路理論に基づいて数値解析的に計算すると、図 1 の結果が得られる。この図で、横軸が設計中心周波数で正規化された周波数であり、縦軸の破線、点線、実線、一転鎖線が S パラメータの S_{11} 、 S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} の大きさを表す。 S_{41} および S_{21} の周波数特性を見ると、 -18 dB 以下で設計中心周波数を中心とした $\pm 2.5\%$ (比帯域 5%) の周波数範囲で 0dB カプラとして動作 ($|S_{31}|=0$) することが確認できる。

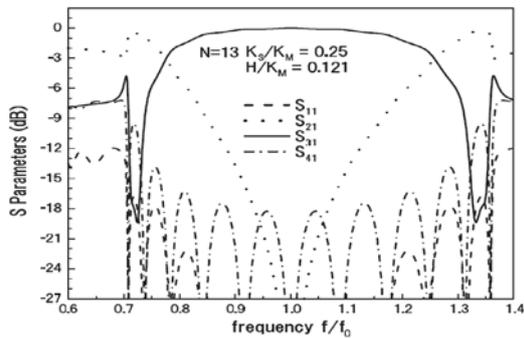


図 1 0dB ブランチラインカップラの周波数特性 ($N=13$)

上記の結果に基づいて、WR-10 の導波管に接続されることを想定して偏波分離器の設計を行ったところ、細部は図 2 のようになった。図中の Depth で示された寸法は、紙面に対して垂直方向の導波管の幅を示している。

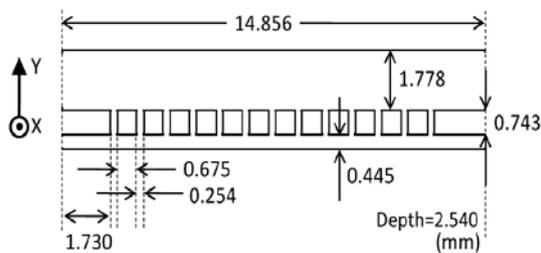


図 2 偏波分離器の細部の構造

図 2 の構造に管内波長の約 6 倍のテーパ型インピーダンス変換部を組み合わせると偏波分離器を構成し、計算された電界強度分布を図 3 と図 4 に示す。



図 3 水平偏波成分入力時の電界強度分布

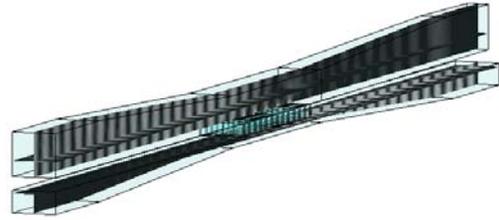


図 4 垂直偏波成分入力時の電界強度分布

図 3 を見ると、水平方向の偏波成分 (寝た状態の向きの電界成分) をもつ電磁波が、左側上部の入力ポート (Port1) から右側上部のポート (Port2) に出力されている様子が分かる。この時、カットオフ周波数の関係で、ブランチラインの部分を電磁波が通過することはない。また、図 4 を見ると、垂直方向の偏波成分 (立った状態の向きの電界成分) をもつ電磁波が、左側上部のポート (Port1) から右側下部のポート (Port3) に出力されている様子が分かる。この時、ブランチラインの部分が 0dB カプラとして機能し、電磁波が上部導波管から下部導波管へ通過する。図 3、図 4 のどちらの場合にも、左側上部の入力ポート (Port1) から左側下部の終端ポート (Port4) に出力される様子は確認できない。

偏波分離器の計算された S パラメータの周波数特性を図 5 に示す。横軸が周波数、縦軸が S パラメータの大きさである。▲は Port1 に水平方向の偏波成分が入って Port2 に水平方向の偏波成分として抜ける場合の S パラメータ (水平方向の偏波成分の挿入損失) であり、△は Port1 に垂直方向の偏波成分が入って Port3 に垂直方向の偏波成分として抜ける場合の S パラメータ (垂直方向の偏波成分の挿入損失) である。図 5 から、95GHz から 100GHz までの周波数範囲で偏波分離器として機能することが確認でき、挿入損失は 0.2dB 以下であることが分かる。また、水平方向および垂直方向の偏波成分の反射損失 (図の、×, +) は 24dB 以上で、水平方向と垂直方向の双方の偏波出力の間のアイソレーション (図の▽) が 50dB 以上であることが確認できる。△の挿入損失は、図 5 の S_{41} の周波数特性が示しているように、Port1 に入力した垂直方向の偏波成分が終端ポート (Port4) に抜けてしまうこと (図 5 の○) に起因するものである。

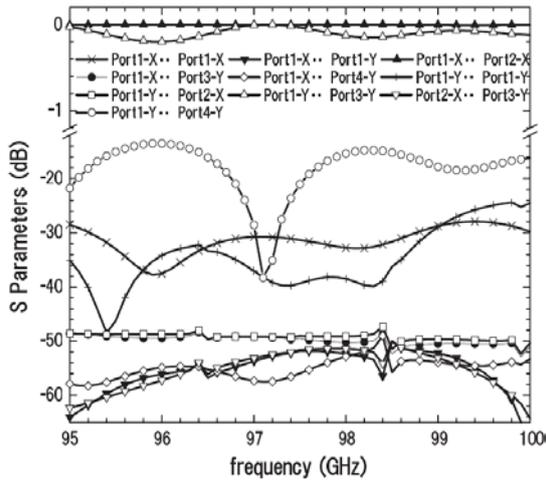


図5 偏波分離器の周波数特性

(2) 「小型化」に関する研究成果

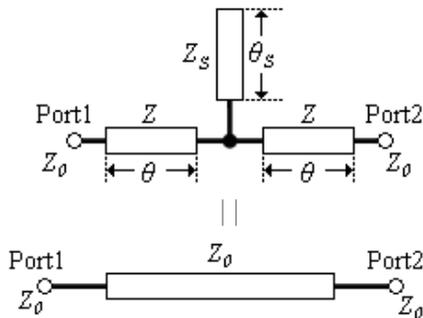


図6 通常の伝送線路の構造

図6に示すように、特性インピーダンスが Z で電気的長さが 2θ の主伝送線路の中央に特性インピーダンスが Z_s で電気的長さが θ_s のスタブを配置した構造が、ある周波数で特性インピーダンス Z_0 の通常の $\lambda/4$ 長の伝送線路のように振舞うものとする。このスタブを配置した伝送線路において、Port1から入力された信号が無反射でPort2に伝わるといふ条件を与えたとき、主伝送線路の特性インピーダンス Z と、スタブの特性インピーダンス Z_s は、

$$Z = \frac{Z_0}{\tan \theta}, \quad Z_s = \frac{Z^2 Z_0}{Z^2 - Z_0^2} \tan \theta_s$$

となる。これらの関係式より、主伝送線路の電気的長さ θ 、主伝送線路の特性インピーダンス Z を任意に決定することができるので、主伝送線路の長さを短くして小型化を行うことができる。

通常の2ブランチの3dBカプラにこの関係式を適用すると、図7のような形で3dBブランチラインカプラがデザインできる。

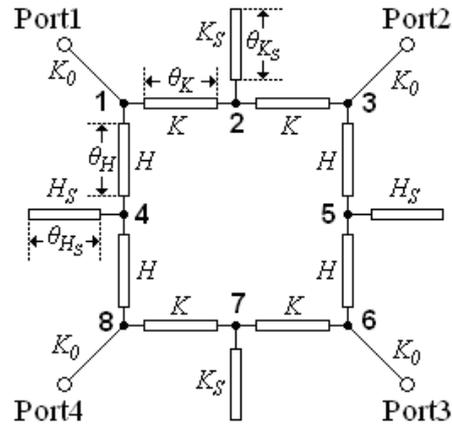


図7 スタブ付きブランチラインカプラ

入出力 Port の特性インピーダンス K_0 を 50.0Ω とし、主伝送線路の特性インピーダンスを $H=K=82\Omega$ と定めると、主伝送線路の電気的な長さは $\theta_K = \pi/7.78(\text{rad})$ 、 $\theta_H = \pi/5.5(\text{rad})$ となる。また、スタブの電気的な長さを $\theta_{Ks} = \pi/6(\text{rad})$ 、 $\theta_{Hs} = \pi/9(\text{rad})$ と定めると、 $H_s=30.3\Omega$ 、 $K_s=25.1\Omega$ となる。これらの値に基づいて回路理論的に解析すると、図8のような結果が得られた。

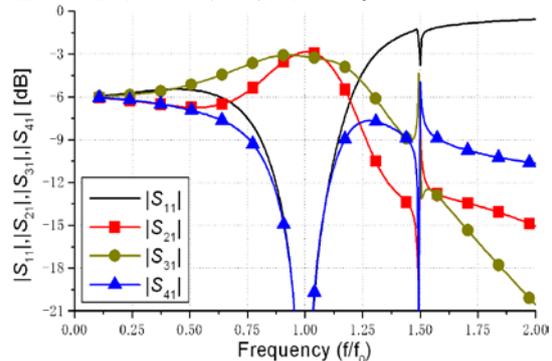


図8 円形カプラの回路理論的な計算結果

図8の縦軸は S パラメータ[dB]の値、横軸は設計中心周波数で正規化した周波数 (f/f_0) である。設計中心周波数付近において $|S_{11}|$ 、 $|S_{41}|$ が -20dB 以下、 $|S_{21}|$ 、 $|S_{31}|$ が $-3 \pm 0.5\text{dB}$ 以内であり、3dBカプラとしての性能を満たしている。

さらに、上記の結果に基づいて、図9のような小型円形のスタブ付き3dBブランチラインカプラを製作し、測定したところ、図10の測定結果を得ることができた。

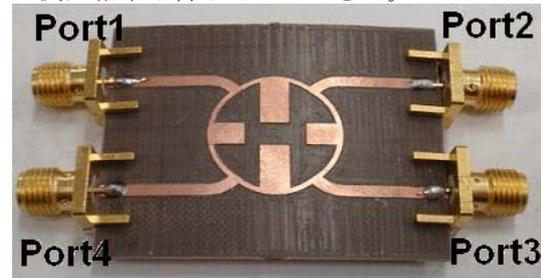


図9 小型円形のブランチラインカプラ

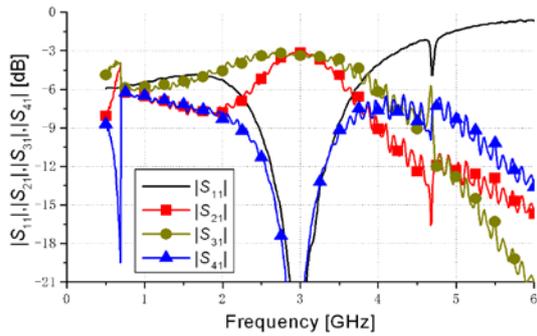


図 10 小型円形カプラの測定結果

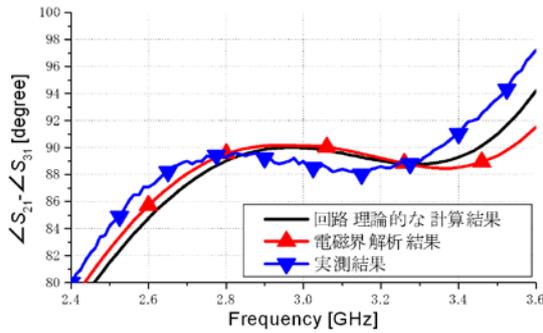


図 11 小型円形カプラの位相特性

図 9 の円形小型カプラは円周(外周)の直径が 17.9mm で通常の 3dB ブランチラインカプラと比較して面積が 30%小さくなっており、図 10 から分かるように、設計中心周波数 3GHz において $|S_{11}|$ 、 $|S_{41}|$ が -20dB 以下、 $|S_{21}|$ 、 $|S_{31}|$ が $-3 \pm 0.5\text{dB}$ 以内であることが確認できる。また、図 11 より、 S_{21} と S_{31} の位相差が設計中心周波数 3GHz において約 90° となっており、90 度ハイブリッドカプラとしての性能を満たしていることが確認できた。

(3) 「二次元伝送平面」に関する研究成果

高周波コンポーネントの縮約・小型化を考える場合に役立つ二次元伝送平面に関する回路理論的な解析手法を考案し、解析結果と実験結果がよく一致することを確認した。図 12 に円形二次元伝送平面の共振特性の実験結果と回路理論的な計算結果を示す。横軸の D は伝送平面の直径、 λ は信号の波長である。

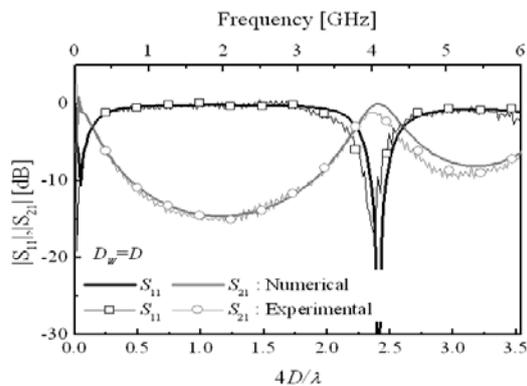


図 12 二次元伝送平面に関する解析結果と実験結果

この結果を複数ポート回路に応用して、一般的な 180° ハイブリッドカプラなどの機能を持たせ得ることも確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 大嶽知夏、安藤浩哉、四端子対回路網の縦続行列と散乱行列に関する考察、豊田工業高等専門学校研究紀要、査読無、Vol. 43、2011、pp. 25-42.
- ② 安藤浩哉、柳智子、塚本武彦、杉浦藤虎、同じ幅のブランチラインを有する偏波分離器、電子情報通信学会論文誌 C、査読有、Vol. J93-C No. 8、2010、pp. 249-255.

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 小野裕明、大嶽知夏、安藤浩哉、左手系伝送線路の単位セルを持つ $\lambda/4$ 伝送線路に関する研究、電子情報通信学会 2011 総合大会後援論文集 C-2-71、2011 年 3 月 15 日、東京都市大学 (震災のために概要集発行のみ) .
- ② 大野恭平、柴田純也、安藤浩哉、塚本武彦、杉浦藤虎、二次元伝送平面の等価回路に基づいた数値解析、電子情報通信学会 2010 年総合大会、C-2-56、2010 年 3 月 16 日、東北大学.
- ③ 安藤浩哉 ブランチライン型偏波分離器、第 10 回 受信機ワークショップ「ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ」、2010 年 03 月 05 日、東京大学 天文学教育研究センター.
- ④ Masumi Inoue、Kemmei Kajino、Hiroya Andoh、Taishi Kimura、Akira Fujimaki、Simulation Study on the Properties of YBCO Nano-bridges for Circuit Applications, International Superconductive Electronics Conference 2009, TD-P16.
- ⑤ 柴田純也、安藤浩哉、大野恭平、杉浦藤虎、塚本武彦、スタブを用いた小型円形 3dB ブランチラインカプラ、電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2008 年 エレクトロニクス (1)、81、C-2-56、2008/09/02.

〔その他〕

ホームページ等

http://www.astro.s.osakafu-u.ac.jp/rxws10/greenings/data/RxWS10_4_04.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 浩哉 (ANDOH HIROYA)
豊田工業高等専門学校・情報工学科・教授
研究者番号：30212674

(2) 連携研究者

前澤 宏一 (MAEZAWA KOICHI)

富山大学・工学部・教授

研究者番号：90301217

藤巻 朗 (FUJIMAKI AKIRA)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20183931

井上 真澄 (INOUE MASUMI)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00203258

塚本 武彦 (TSUKAMOTO TAKEHIKO)

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・教授

研究者番号：10217284

杉浦 藤虎 (SUGIURA TOUKO)

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・教授

研究者番号：70206407