

蛍光管パラボラアンテナを利用した ミリ波パッシブイメージングにおける物体検知特性の改善

栗山 弘平[†] 中田 淳^{††} 佐藤 弘康[†] 澤谷 邦男[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6 6 05
^{††} 中央電子株式会社 〒192-8532 東京都八王子市元本郷町1丁目9番9号
E-mail: †{kuriyama,sahiro,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp, ††nakada@cec.co.jp

あらまし 一様なミリ波帯熱雑音の放射源として直管形蛍光管を放物筒面の焦線に配置した蛍光管パラボラアンテナを提案している。開発した77 GHz帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて蛍光管と人体が放射している熱雑音強度を測定した結果、蛍光管の熱雑音は人体よりも約3 dB大きいことがわかった。また、試作した蛍光管パラボラアンテナを人体の後方に配置した場合、開口面にわたり人体よりも約1 dB大きい熱雑音強度が得られた。さらに、人体の輪郭付近にCD-ROMを配置してもCD-ROMの輪郭が判別できることを示し、ミリ波パッシブイメージングにおける物体の検知特性が改善されることを示している。

キーワード パッシブイメージング, パラボラ, アンテナ, 蛍光管, 熱雑音源

Improvement of Object Recognition in Passive Millimeter Imaging Using Fluorescent Tube With Parabolic Reflector Antenna

Kohei KURIYAMA[†], Jun NAKADA^{††}, Hiroyasu SATO[†],
and Kunio SAWAYA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba-ku, Sendai 980 8579, Japan
^{††} Chuo Electronics Corporation Ltd., Tokyo 192-8532, Japan
E-mail: †{kuriyama,sahiro,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp, ††nakada@cec.co.jp

Abstract A source of uniform millimeter wave thermal noise consisting of a fluorescent tube and a conducting parabolic cylinder reflector is proposed. Measurement of thermal noise intensity produced by fluorescent tube and the human body at the image plane using a 77 GHz passive millimeter wave imaging device shows thermal noise intensity of a fluorescent tube is about 3 dB larger than that radiated by the human body. It is also shown that the thermal noise intensity radiated by the noise source is about 1 dB larger than that of human body. Finally, it is shown that the shape of CD-ROM located at the outline of the human body can be estimated by using the proposed noise source.

Key words Passive imaging, Parabola, Antenna, Fluorescent tube, Noise source

1. ま え が き

近年、テロ・犯罪等によって安全・安心な社会が脅かされてきており、液体爆発物やプラスチック爆弾等、金属探知機で検知できない不審物を所持する不審者を迅速に検知する手段が望まれている。ミリ波パッシブイメージングは、人や物から放射されるミリ波帯の熱雑音を受信し、非接触・非侵襲で衣服下の不審物を検知可能な技術として、実用化が期待されている [1]。

筆者らはこれまで、空港等の水際において使用するための77

GHz帯ミリ波パッシブイメージング装置を開発し、実用性について評価を進めてきた [2-3]。特に、装置による不審物の検知の自動化、プライバシーへの配慮を目的として、ミリ波画像に映し出される不審物の位置、大きさに応じたマークを光学画像に重ねて表示するマーキングの画像処理技術について検討してきた [4]。その中で、人体と背景の境界付近、即ち人体の輪郭付近に置かれた人体よりも熱雑音の放射の小さい物体の検知とマーキングが困難となるという問題が生じていた。検知特性を改善するためには、画像処理を用いて人体の輪郭を連続した曲線で

閉じる方法や背景面全体の熱雑音強度を人体の熱雑音強度より大きくする方法等が考えられる．後者の方法では，背景面全体で人体より大きな熱雑音強度を有する熱雑音源が必要となる．

蛍光管がミリ波帯の熱雑音を放射することが報告されている [5, 6]．蛍光管には棒状の直管形蛍光管，ドーナツ状の環形蛍光管，電球形などさまざまな形状があり，波長が異なる蛍光管も数種類販売されている．この蛍光管を背景に配置して背景の熱雑音強度を増加させることができれば，安価な熱雑音源が実現できる．

本報告では，ミリ波パッシブイメージングにおいて人体の輪郭付近に置かれた人体よりも熱雑音の放射の小さい物体の検知特性を改善することを目的として，直管形蛍光管を放物筒面の焦点に配置した蛍光管パラボラアンテナを提案する．また，既に関連した 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて蛍光管および試作した蛍光管パラボラアンテナが放射している熱雑音強度分布を測定した結果を示すとともに，人体の後方に蛍光管パラボラアンテナを配置したときの人体の輪郭付近に置かれた物体の検知特性について評価する．

2. 光学系と蛍光管のミリ波帯熱雑音強度

2.1 光学系と逆光

熱雑音源と人体を被写体とした光学系の構成および座標系を図 1 に示す．レンズの光軸を z 軸とし，物体面 $z = z_{ob}$ に立つ人が放射しているミリ波帯の熱雑音を，レンズを介して像面 $z = z_{im}$ に集光し，この像面に置かれたイメージング素子アレーで熱雑音を受信，増幅及び検波し受信電圧の 2 次元分布を画像化してミリ波画像を得る [2-3]．人体の背景に位置する背景面を $z = z_b$ とすると，背景面からの熱雑音は人体の像面 $z = z_{im}$ とは異なる位置に結像するので，背景面はピン트가ずれた状態にある．

この背景面 $z = z_b$ 内の視野全体に置かれた蛍光灯等の熱雑音源を考える．物体面 $z = z_{ob}$ に置かれた人体が像面 $z = z_{im}$ に作る熱雑音強度を $P_h(z_{im})$ ，背景面 $z = z_b$ に置かれた蛍光灯が像面 $z = z_{im}$ に作る熱雑音強度を $P_f(z_{im})$ とし， P_h と P_f が xy 面上で一定であるとすれば

$$P_h(z_{im}) = P_f(z_{im}) \quad (1)$$

を満たすときに人体は見えなくなり一様なミリ波画像が得られる．実際には人体には温度分布が存在するが，人体と背景の熱雑音強度はほぼ同じ値となるので，この輪郭付近に置かれた人体よりも熱雑音強度の小さい物体は見やすくなる．これは光学の分野ではいわゆる“逆光”として知られており，本報告の目的は

$$P_h(z_{im}) \leq P_f(z_{im}) \quad (2)$$

となるような背景面に置かれる熱雑音源を作製することである．

2.2 蛍光管のミリ波帯熱雑音強度の測定

蛍光管の色の種類としては三波長型，昼光色，昼白色，白色，温白色，電球形等がある．このうち昼光色，昼白色，電球形の 3 種類の熱雑音強度を測定した．蛍光管は直径 25.5 mm，27 形

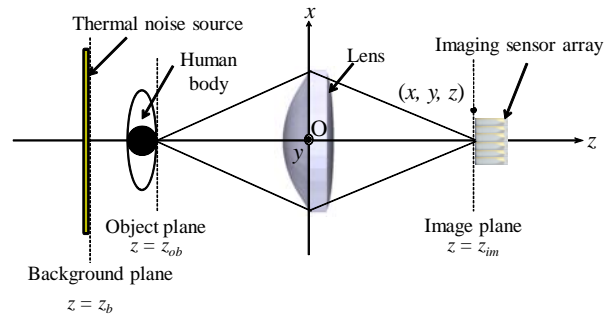


図 1 熱雑音源と人体を被写体とした光学系の構成および座標系．

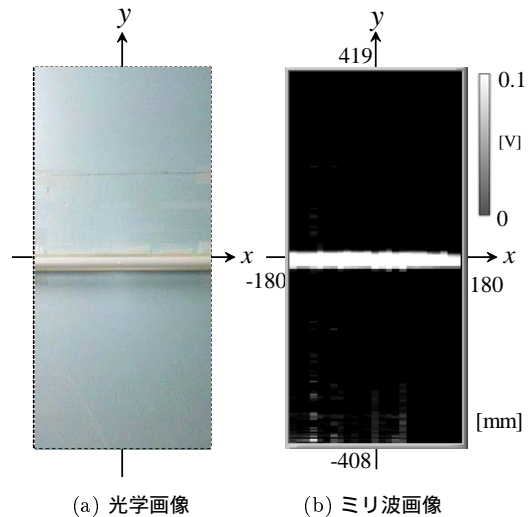


図 2 昼光色蛍光管のミリ波画像 ($z_{ob} = -1950$ mm, $z_{im} = 1081$ mm)．

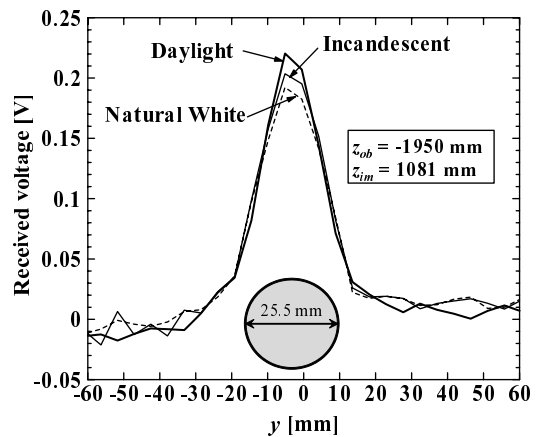


図 3 色種類の異なる蛍光管を物体面 $z_{ob} = -1950$ mm に配置したときの y 軸に沿う受信電圧分布の比較 ($z_{im} = 1081$ mm, 昼光色 (Daylight), 電球形 (Incandescent) および昼白色 (Natural White))．

グロー式の直管形である．また，熱雑音強度の測定には，開発したミリ波パッシブイメージング装置を用いた [2-4]．イメージング装置は口径が 500 mm の誘電体レンズ，振動リフレクタ，水平配列 25 素子 1 次元イメージング素子アレーからなり [2-3]，振動リフレクタを垂直面で振動させることにより 77 GHz 帯 2 次元受信電圧分布が得られる．

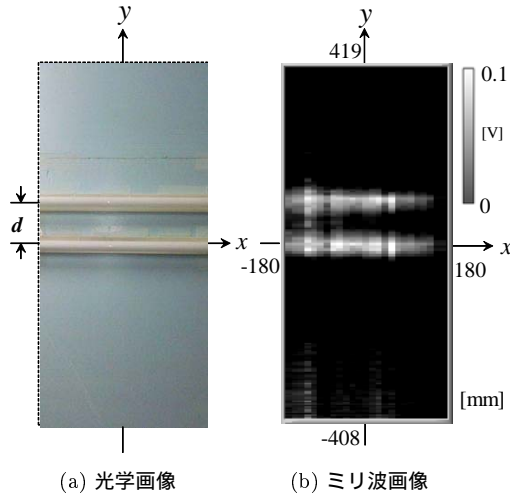


図 4 中心間距離 $d=120$ mm の昼光色蛍光管 2 本のミリ波画像 ($z_b=-2450$ mm, $z_{im}=1081$ mm).

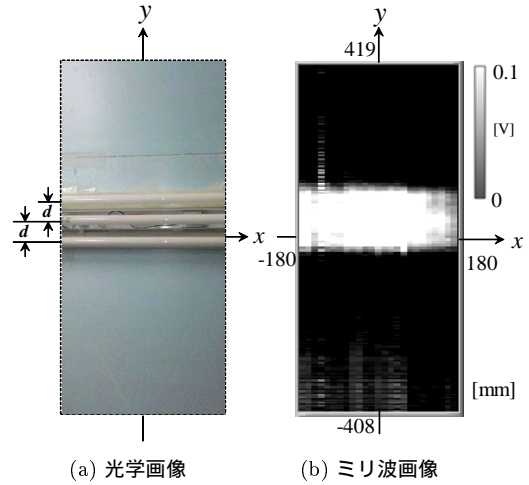


図 6 中心間距離 $d=60$ mm の昼光色蛍光管 3 本のミリ波画像 ($z_b=-2450$ mm, $z_{im}=1081$ mm).

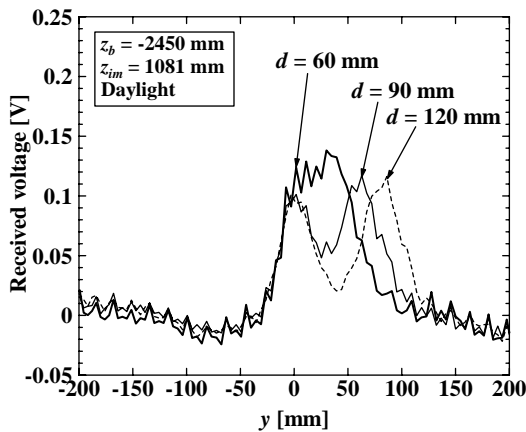


図 5 中心間距離 d の昼光色蛍光管 2 本を背景面 $z_b=-2450$ mm に配置したときの y 軸に沿う受信電圧分布 ($z_{im}=1081$ mm, $d=60$ mm, 90 mm, 120 mm).

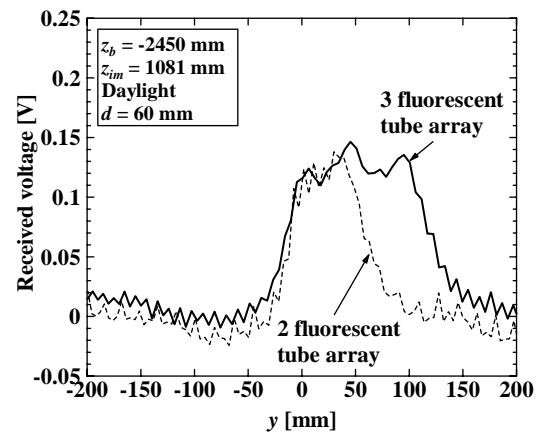


図 7 中心間距離 $d=60$ mm の昼光色蛍光管アレーの y 軸に沿う受信電圧分布 ($z_b=-2450$ mm, $z_{im}=1081$ mm).

管軸が x 方向に平行な昼光色蛍光管 1 本を物体面 $z_{ob}=-1950$ mm に配置したときの $z_{im}=1081$ mm におけるミリ波画像を光学画像と共に図 2 に示す。ただし、色が白いほど受信電圧が大きいことを表している。なお、物体面 $z_{ob}=-1950$ mm に蛍光管を配置したときに距離 $z=1081$ mm において受信電圧が最大となることからこの位置を像面と判断し、イメージング素子アレーを像面 $z_{im}=1081$ mm に固定した。図 2 から、直管形蛍光管は管軸方向に概ね一様な熱雑音強度をもつことがわかる。以後、物体面は $z_{ob}=-1950$ mm、像面は $z_{im}=1081$ mm とする。

色種類が昼光色、電球色および昼白色の蛍光管について、蛍光管を物体面に配置したときの y 軸に沿う受信電圧分布を図 3 に示す。熱雑音強度は昼光色、電球色、昼白色の順に強く、最大値はそれぞれ 0.22 V, 0.2 V, 0.19 V であった。人体を同じ物体面で撮像した場合、人体における受信電圧の平均値は約 0.1 V 程度であることがわかっており、ミリ波帯における蛍光管の放射熱雑音強度は人体の平均値よりも約 3 dB 大きい。以降の実験では、ミリ波帯の熱雑音を最も強く放射している昼光色蛍光管を用いた。

次に、蛍光管を背景面 $z = z_b$ に配置したときの熱雑音強度を評価した。背景面 $z_b=-2450$ mm に昼光色蛍光管 2 本を $d=120$ mm 隔てて配置したときのミリ波画像を光学画像と共に図 4 に示す。物体面に配置した図 2 に比べて熱雑音強度が弱くなった。また、蛍光管の中心間距離 $d=120$ mm では 2 本の蛍光管が分離した。中心間距離が $d=60$ mm, 90 mm, 120 mm のときの y 軸に沿う受信電圧分布を図 5 に示す。どの d についても物体面に置かれた場合の図 3 に比べて受信電圧の最大値が低下した。また、 $d=60$ mm の場合は -20 mm $\leq d \leq 40$ mm の範囲で y 方向に概ね一様な受信電圧分布が観測された。

中心間距離 $d=60$ mm の昼光色蛍光管 3 本を背景面に配置したときのミリ波画像および y 軸に沿う受信電圧分布をそれぞれ図 6, 7 に示す。ただし図 7 には蛍光管が 2 本の場合も示してある。蛍光管を 3 本に増加させることにより熱雑音強度が一般的な範囲が広がった。また、蛍光管の数によらず、受信電圧は 0.13 V 程度の値が得られた。この値は人体における受信電圧の平均値 0.1 V に対して約 1 dB の増加であり、蛍光管アレーが式 (2) を満たすことがわかった。

以上の結果から、図 8 に示すように、昼光色直管形蛍光管を

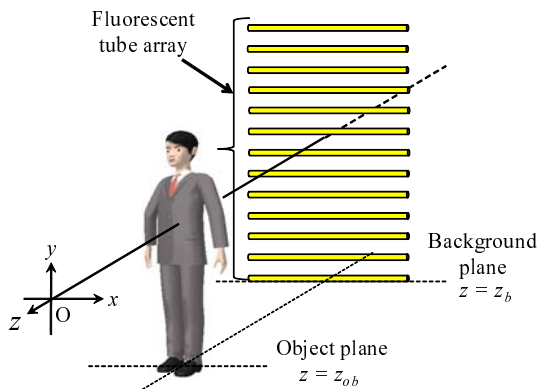


図 8 背景面 $z = z_b$ に配置した蛍光管アレー．

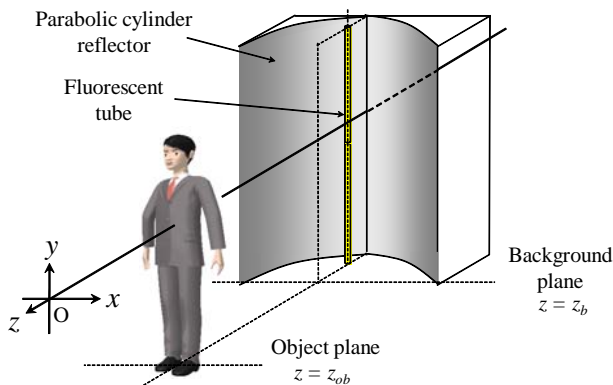


図 9 背景面 $z = z_b$ に配置した蛍光管放物筒面反射鏡．

背景面に中心間距離 $d \leq 60$ mm で並べることにより人体の輪郭付近に置かれた物体の検知特性の改善が見込まれる．しかしながら，たとえば人体の幅をカバーするために長さ 1 m の 35 形直管形蛍光管を中心間距離 $d=60$ mm で管軸が x 方向となるように並べ，身長をカバーする高さ 2 m に敷き詰める場合，33 本の蛍光管が必要となり，消費電力は 1155 W 必要となり消費電力が問題となる．

3. 蛍光管パラボラアンテナ

直管形蛍光管の構造に着目し，蛍光管を放物筒面の焦線に配置した蛍光管パラボラアンテナを提案する．背景面 $z = z_b$ に配置した蛍光管パラボラアンテナを図 9 に示す．放物筒面は 1 枚の導体板の左右の端部を $\pm x$ 方向からの力で押し曲げることにより容易に製作できる．また，必要な直管形蛍光管の本数は，市販の 35 形であれば 2 本，110 形であれば 1 本で済むため，消費電力が小さい．

図 9 の蛍光管パラボラアンテナの実現性を評価する目的で，図 10 に示すように開口面サイズが 500 mm×300 mm の蛍光管オフセットパラボラアンテナを試作した．放物筒面はアルミ板で作成し，曲面を支持するために発泡スチロールを電熱線でカーブに沿ってカットして製作した．放物筒面の焦線に配置した蛍光管には反射板がついているものを使用し，この副反射鏡を図 10(b) に示すように主反射鏡のほぼ中央に向けた．

蛍光管オフセットパラボラアンテナおよび人体を配置した光

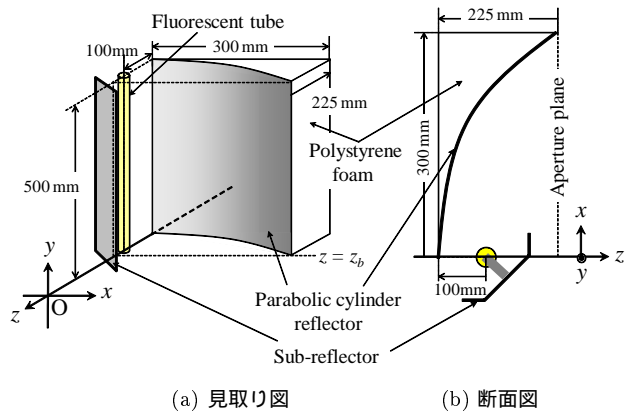


図 10 蛍光管オフセットパラボラアンテナの構造 (開口面サイズ: 500 mm×300 mm)．

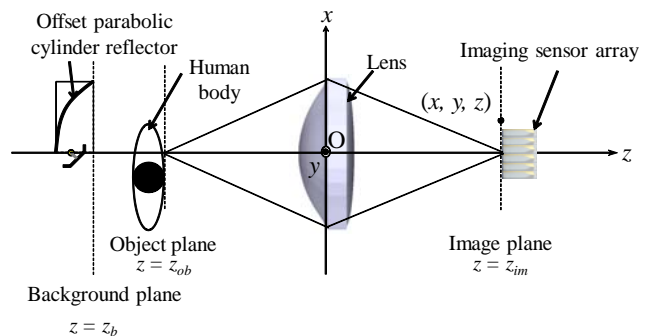


図 11 蛍光管オフセットパラボラアンテナおよび人体を配置した光学系の構成と座標系．

学系の構成と座標系を図 11 に示す．人体は物体面 $z_{ob} = -1950$ mm において光軸から $-x$ 方向に 20 cm 程度ずれた位置に立ち，パラボラは開口面端部が背景面 $z_b = -2450$ mm に一致した状態で光軸から $+x$ 方向に 50 mm ずれた位置に配置した．

人体がない場合の，蛍光管オフセットパラボラアンテナを背景面に配置したときのミリ波画像を図 12 に示す．パラボラアンテナの開口面の広い範囲において熱雑音強度が大きい分布が得られた． $x = 7.2$ mm, 50.5 mm, 93.8 mm のときの y 軸に沿う受信電圧分布を図 13 に示す．開口面の中央にあたる $x = 50.5$ mm 付近で受信電圧が最大となり，0.2 V 以上の値が得られた． x 方向については必ずしも様な分布とは言えないが， x 方向および y 方向ともに放物筒面の開口面内で 0.13 V 以上の受信電圧が得られており，蛍光管アレー同様，式 (2) を満たすことがわかった．

CD-ROM を人体の左腕上部に所持した人が物体面に立ち，蛍光管オフセットパラボラアンテナによる雑音源が背景面にない場合とある場合のミリ波画像をそれぞれ図 14，図 15 に示す．雑音源がない場合，CD-ROM の面積の半分程度が人体領域にあり，輪郭の半分および穴も得られているが，残りの半分は背景に埋もれていることがわかる．このように正面からの撮像のみでは視認性および検知特性が劣化することになり，対象物が装置の正面に来るように被験者に回転してもらう必要がある．

一方，雑音源がある場合，人体の輪郭付近に置かれた CD-

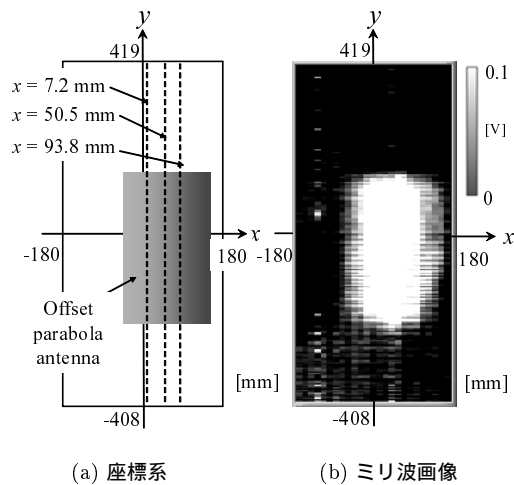


図 12 蛍光管オフセットパラボラアンテナのミリ波画像 ($z_b = -2450$ mm, $z_{im} = 1081$ mm).

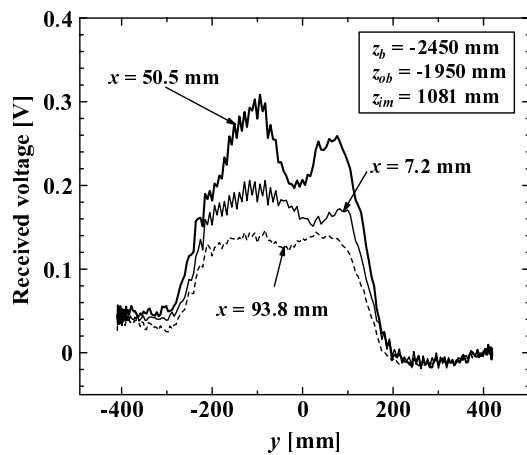


図 13 蛍光管オフセットパラボラアンテナの y 軸に沿う受信電圧分布 ($z_b = -2450$ mm, $z_{im} = 1081$ mm, $x = 7.2$ mm, 50.5 mm, 93.8 mm).

ROM の輪郭および穴が明確に視認できるミリ波画像が得られた。この画像に対して画像処理を適用することにより CD-ROM の面積、位置等を推定することができ、物体のマーキングが容易となる。以上の結果から、蛍光管パラボラアンテナを雑音源として背景面に配置する方法を用いて従来検知できない人体の輪郭付近に置かれた物体の検知が可能となり、その有効性が示された。

4. まとめ

直管形蛍光管を放物筒面の焦点に配置した蛍光管パラボラアンテナを提案した。77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて蛍光管と人体が放射している熱雑音の強度を測定した結果、蛍光管は人体よりも約 3 dB 大きいことがわかった。試作した蛍光管パラボラアンテナを人体の後方に配置した場合、開口面にわたり人体よりも約 1 dB 大きい熱雑音強度が得られた。さらに、これを人体の後方に配置することにより、ミリ波パッシブイメージングにおける人体の輪郭付近に置かれた物体の検知特性が改善されることを示した。今後、人全身の背景の

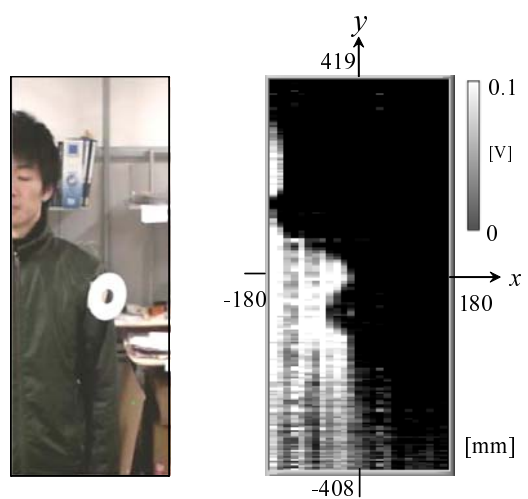


図 14 CD-ROM を人体の左腕上部に所持した人のミリ波画像 ($z_{ob} = -1950$ mm, $z_{im} = 1081$ mm)。

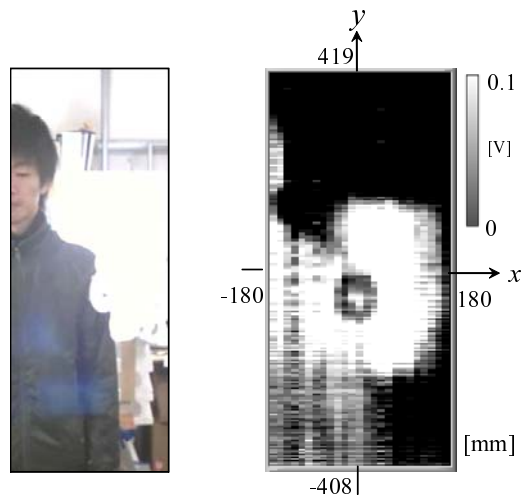


図 15 CD-ROM を人体の左腕上部に所持した人のミリ波画像。蛍光管オフセットパラボラアンテナをおいた場合 ($z_b = -2450$ mm, $z_{ob} = -1950$ mm, $z_{im} = 1081$ mm)。

熱雑音強度を増加可能なパラボラアンテナの設計を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」の助成の下に行われた。

文 献

- [1] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, “ミリ波パッシブイメージング技術(セキュリティ分野への応用を主に),” 計測と制御, 第 42 巻, 第 1 号, pp. 748-753, 2009.
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “77GHz 帯ミリ波パッシブ撮像装置の開発,” 2009 年電子情報通信学会総合大会, CS-4-1, 2009.

- [3] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置,” 2010 年電子情報通信学会総合大会, B-1-150, 2010 .
- [4] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, J. Uemura, M. Takeda, J. Takahashi, K. Yamada, K. Morichika, T. Hasegawa, H. Hirai, H. Niikura, T. Matsuzaki, S. Kato, J. Nakada, “Passive millimeter-wave imaging for security and safety applications,” SPIE Proceedings, vol. 7671, Orlando, USA, 2010 .
- [5] K. Mizuno, H. Matono, Y. Wagatsuma, H. Warashina, H. Sato, S. Miyanaga, Y. Yamanaka, ”New applications of millimeter-wave incoherent imaging (Invited)”, Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium, pp.629.632, USA, June 2005 .
- [6] 藁科秀男, 的野春樹, 宮永聖子, 我妻壽彦, 水野皓司, “蛍光灯を光源としたミリ波帯イメージング,” 2009 年電子情報通信学会総合大会, C-2-112, 2009 .