5

ミリ波イメージング

[正会員] 澤谷 邦男[†], 佐藤 弘康[†], 水野 皓司^{††}

キーワード ミリ波, イメージング, セキュリティ

1 ま え が き

周波数範囲が30GHz～300GHzのミリ波は、UHFやマイクロ波帯よりも周波数が高いので、広い周波数帯域を利用することが可能であるという利点を有しており、従来に比べて桁違いの伝送速度を持つ次世代60GHz帯高速無線LANなどへの利用が計画されている。一方、ミリ波は低い周波数に比べて基本伝送損が大きく、また雨や空気中の分子による吸収も大きいので、遠距離まで伝搬しにくいという特性を有している。このため、上記のミリ波無線LANや自動車に搭載されている衝突防止用レーダでは、比較的近距离の通信・計測に限定されている。

ミリ波のイメージングへの応用を考えたとき、ミリ波は可視光や赤外線、テラヘルツ波に比べて物体の透過率が高いことから、衣服の中の対象物を画像化するのに適しているといえる。また、ミリ波は移動通信などで利用されているUHFやマイクロ波に比べて波長が短いため、空間分解能が高いという利点も有している。2009年12月に米国で発生したデルタ航空機爆破テロ未遂事件以降、金属探知機による乗客の検査やX線による手荷物検査に加えて、乗客が衣服の下に隠し持った金属以外の爆発物などを検出するためのボディスキャナの導入が検討され、ミリ波やテラヘルツ波を利用したイメージング技術が注目を集めている¹⁾。さらに、ミリ波は衣服だけではなく損失の小さい建材等を透過するので、壁を隔てた空間、さらには炎や煙の先のイメージングなどへの応用が考えられる。

本稿では、ミリ波の性質とこれを用いたパッシブイメージングの原理²⁾について述べるとともに、これをボディスキャナに応用した例を紹介する^{3)～5)}。

2 パッシブイメージングとアクティブイメージング

電磁波を用いたイメージングにはパッシブイメージングとアクティブイメージングがある。アクティブイメージン

グでは、レーダのように電波を物体に照射し、物体から散乱された電波を受信して、往復に要する時間や散乱された電波の強度を利用してイメージングする方法である。この方法はパッシブ方式に比べて鮮明な画像が得られるという利点を有しており、米国の空港の一部で保安検査に利用されている。その反面、安定したパルスを送信する高性能な送信機が必要であり、また受信した信号に対して複雑な信号処理をする必要があるため、装置が高価になってしまう。また、人体に向けて照射される電波の強度は十分に弱く、人体に与える影響はないものと考えられるが、電波照射に対する拒否反応が危惧される。さらに、画像が鮮明であるために、プライバシーの侵害を問題視する人も少なくない。

一方、パッシブイメージングは、人体や対象物が放射する熱雑音を画像化する方法であり、送信機が不要であるという大きな利点を有している。また、レンズや反射鏡の焦点付近に置かれたイメージングのセンサ素子の受信強度を画像化するので、複雑な信号処理も不要であることから、装置の低コスト化が可能である。さらに、電波照射に対する拒否反応を危惧する必要もない。一方、欠点としては、アクティブ方式に比べて画像の鮮明さの点で劣る点が挙げられる。ただし、保安検査において、隠し持っている対象物を完全に特定することは、プライバシー保護の立場から見てもむしろ問題であり、予備選別(Screening)だけ充分であり、画像の鮮明さの点で劣ることがむしろ利点にもなり得るとの見方もある。

3 ミリ波パッシブイメージングの原理

上述のように、パッシブイメージングは物体が放射する熱雑音を利用したイメージングである。図1に示すように、人体を含む物体は絶対温度が0でない限り、電磁波(電波だけでなく赤外線、可視光なども)を放射しており、物体の温度が高くなると強い電磁波を放射する²⁾。したがって、赤外線の放射強度を撮影することにより物体の温度を推定することが可能であり、サーモグラフィとして実用化されている。

熱によって発生する電磁波は、通信などに用いる電磁波とは異なり、周波数、振幅、位相、偏波が時間に対してラ

[†] 東北大学 大学院工学研究科^{††} 東北大学 電気通信研究所

"Millimeter Wave Imaging" by Kunio Sawaya, Hiroyasu Sato (School of Engineering, Tohoku University, Sendai) and Koji Mizuno (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai)

図1 ミリ波パッシブイメージング装置の原理

図2 ミリ波パッシブイメージング用センサ素子の構成

ンダムに変化しており、熱雑音とも呼ばれ、無線通信や放送などの分野では信号を乱す厄介な存在である。パッシブイメージング装置は、物体が放射する熱雑音を利用した装置であり、赤外線よりも周波数が低いミリ波を利用していることを除けば、サーモグラフと同じ原理を利用している。ただし、可視光や赤外線カメラに用いられるフィルムやCCDイメージセンサをミリ波で用いることはできないので、別の方法で熱雑音の強度分布を記録する必要がある。図2に示すように、受信アンテナと低雑音増幅器、検波器などで構成されるセンサが必要となる^{3)~5)}。これらのデバイスは通信でも用いられるが、受信する対象が信号ではなく熱雑音であるという点で通信とは大きく異なる。特に、増幅器や検波器はそれ自体が雑音を発生するので、これらの熱雑音が物体から放射された熱雑音よりも充分小さいことが要求される。

外部から入射する電磁波を完全に吸収する黒体(可視光であれば黒の物体、電波であればすべての周波数の電波を吸収する理想的な電波吸収体に相当)の放射率は $\varepsilon = 1$ であり、黒体が放射する電力は $P = kT_0B[W]$ で与えられる。ここで、 $k = 1.38 \times 10^{-23} [J/K]$ はボルツマン定数、 $T_0 [K]$ は黒体の物理温度である。通常の物体は完全な吸収体ではないので、黒体と同じ物理温度であっても放射電力は黒体の場合よりも小さくなり、上式の物理温度 T_0 を輝度温度 T で置き換える必要がある。ここで、輝度温度 T は物理温度 T_0 と放射率 ε (≤ 1)の積 $T = \varepsilon T_0$ で与えられる。例えば、周波数帯域幅を $B = 5GHz$ 、物理温度を $T_0 = 290K$ 、放射率を $\varepsilon = 1$ とすると、放射電力は $P = 20pW$ ($-77dBm$)と極めて微弱なものになる。したがって、雑音指数が小さい高感度な低雑音増幅器を用いる必要がある、また広い周波数帯幅の熱雑音を受信することにより受信電力を大きくすることが重要である。

なお、赤外線やマイクロ波、ミリ波の熱雑音を遠隔で観測し、海面温度や雨、雪、水蒸気等の温度を測定する放射計(Radiometer)も、対象物からの距離が長いことを除けば、その原理はパッシブイメージングの原理と同じである。

4 ミリ波パッシブイメージング装置の開発

東北大学電気通信研究所では、筆者の一人の水野らが1985年頃からミリ波パッシブイメージングの研究を進めてきた²⁾。また、工学研究科電気・通信工学専攻では2000年頃から水野らのグループと協力してイメージング装置に用いる広帯域アンテナの設計を行ってきた^{6)~8)}。東北大学ではこれらの実績に基づいて、マスプロ電工(株)および中央電子(株)と共同で、平成19~21年度文部科学省科学技術試験研究委託事業安全・安心科学技術プロジェクト「ミリ波パッシブ撮像装置の開発」(代表者：東北大学佐藤弘康)を進めてきた。さらに、平成22年度から5年間の計画で、マスプロ電工および中央電子との共同で文部科学省科学技術戦略推進費安全・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支援を受けて「ミリ波パッシブイメージング装置の開発と実用化」(研究代表者：東北大学澤谷邦男)を推進している。

この間、センサ素子を一定の温度に保つことによりセンサ素子の安定性の向上が図られた。また、素子のばらつきの問題を解決するために、撮像方向がある方向を向いたときに各素子の感度が同じになるように校正する方法を考案し、撮像範囲の上端(通常は天井方向)で校正するのが効果的であることを示した⁹⁾。さらに、より実用性を高めるために、装置の小型化が図られた。

研究を通じて開発されたイメージング装置の写真とその構造図を、それぞれ図3、図4に示す。装置に入射したミリ波は平面反射鏡で反射され、通常の光学カメラのレンズに相当する誘電体レンズで集光され、コーナリフレクタで反射された後、1次元センサアレーで受信される。センサアレーは、図2に示したセンサ素子を y 方向に25素子配列したもので、同時に25点のミリ波強度を測定することができる。ミリ波強度の2次元分布を測定するためには、 z 方向にもセンサ素子を配列した2次元センサアレーを用いる必要があるが、そのためには1,000個程度のセンサ素子が必要であり、低コスト化が困難となる。そこで、平面反射鏡の角度が変化する振動反射鏡を用いて、垂直方向に走査し

図3 開発されたミリ波パッシブイメージング装置

図4 開発されたミリ波パッシブイメージング装置の構成

図5 開発されたミリ波パッシブイメージング装置によるイメージの例

て2次元のイメージを得ている。また、上部にコーナリフレクタを導入することにより、高さを従来の試作機の約70%に減少させて小型化を図り、体積および重量をそれぞれ約40%と56%まで減少させることに成功した。

図2に示したセンサ素子は、広帯域特性を有するテーパースロットアンテナの一つであるフェルミアンテナ^{6)~8)}で受信されたミリ波雑音を低雑音増幅器で増幅し、ダイオード検波器で直流電圧に変換して直流増幅器で増幅される。このセンサ素子の直流出力はAD変換器によりデジタル信号に変換され、画像化される。

前述のように、パッシブイメージングはミリ波の熱雑音を画像化するので、受信したい雑音だけを受信することが望ましいが、実際には低雑音増幅器やダイオード検波器においても雑音が発生するので、いかに感度良くミリ波雑音を受信するのが大きな課題となる。

これらの課題を克服するために、さまざまな改良が試みられた。まず、感度の問題に対しては高周波回路の改善が現在も進められている。また、対象物に向けて蛍光灯からのミリ波熱雑音を照射する方法¹⁰⁾、さらには低温の物体からの熱雑音を照射することにより対象物、特に金属の輝度温度を低下させるForward-Nulling法^{11) 12)}を提案し、画像のコントラストの改善を図っている。

図3のイメージング装置を用い、Forward-Nulling法を併用して得られたミリ波イメージの例を図5に示す。衣服の中の携帯電話、カッターおよび金属定規がイメージとして識別できることがわかる。

5 む す び

本稿では、ミリ波を用いたパッシブイメージングの原理について述べるとともに、これをボディスキャナに応用するために開発したイメージング装置について述べた。現在も高性能なイメージング装置の実用化を目指してさらなる改良を図っており、これが達成されれば、ボディスキャナのみならず広い分野に応用できるものと考えている。

最後に、ここで紹介した技術は平成19~21年度文部科学省科学技術試験研究委託事業安心安全科学技術プロジェクトおよび平成22~26年度文部科学省振興調整費科学技術戦略推進費安全・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成果であり、東北大学、マスプロ電気(株)および中央電子(株)の関係各位のご尽力に感謝する。

(2013年3月4日受付)

〔文 献〕

- 1) 水野皓司：“人を守る電波センシング技術について”，計測技術，38，12，pp.1-5 (Nov. 2010)
- 2) 水野皓司，“ミリ波を用いたイメージング”，信学誌，91，12，pp.1047-1053 (Dec. 2008)
- 3) 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，48，10，pp.748-753 (Oct. 2009)
- 4) 澤谷邦男，佐藤弘康，水野皓司：“ミリ波パッシブイメージング技術のセキュリティ応用--ミリ波雑音のカメラを利用したイメージング”，計測技術，38，12，pp.13-16 (Nov. 2010)
- 5) H. Sato, K. Sawaya, K. Mizuno, J. Uemura, M. Takeda, J. Takahashi, K. Yamada, K. Morichika, T. Hasegawa, H. Hirai, H. Niihara, T. Matsuzaki, S. Kato and J. Nakada: "Passive millimeter-wave imaging for security and safety applications", SPIE Proc., 7671, Orlando, USA (2010)
- 6) 佐藤弘康，新井直人，我妻壽彦，澤谷邦男，水野皓司：“コルゲート構造付ミリ波フェルミアンテナの設計”，信学誌，J86-B，9，pp.1851-1859 (Sep. 2003)
- 7) H. Sato, Y. Takagi and K. Sawaya: "High Gain Antipodal Fermi Antenna with Low Cross Polarization", IEICE Trans. Commun., E94-B，8，pp.2292-2297 (Aug. 2011)
- 8) K. Mizuno, H. Matono, Y. Wagatsuma, H. Warashina, H. Sato, S. Miyayama and Y. Yamanaka: "New Applications of Millimeter-Wave Incoherent Imaging", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. pp.629-632 (June 2005)
- 9) 中田淳，佐藤弘康，澤谷邦男，水野皓司，森近慶一，長谷川毅，平井晴之，新倉広高，松崎智彦，植村順：“背景上端温度を利用したミリ波画像のリアルタイム校正法”，2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会，C-2-115 (Sep. 2009)
- 10) 薬科秀男，的野春樹，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”，信学誌，C-2-112 (Mar. 2009)
- 11) H. Sato, K. Kuriyama and K. Sawaya: "Forward-Nulling Passive Millimeter Wave Imaging Using Cooling Dielectric Tube", Proc. 2012 IEEE Int. Symp. on Antennas Propagat., Chicago, USA, 152.5 (July 2011)
- 12) H. Sato, K. Kuriyama and K. Sawaya: "Forward-Nulling Passive Millimeter Wave Imaging Using Cooling Dielectric Tube", IEICE Trans. Electron., E95-C，10，pp.1627-1634 (Oct. 2012)

澤谷 邦男 1976年，東北大学大学院工学研究科博士課程修了。東北大学助手，助教授，教授を経て，現在，東北大学名誉教授，研究支援者。プラズマ中のアンテナ，移動通信用アンテナ，電磁波の散乱・回折，マルチアンテナの研究に従事。当学会東北支部長などを歴任，IEEEフェロー，正会員，工学博士。

佐藤 弘康 1998年，東北大学大学院工学研究科博士課程修了。現在，同研究科通信工学専攻助教。プラズマ中のアンテナ，プラズマ生成装置，広帯域アンテナ，ミリ波イメージングの研究開発に従事，工学博士。

水野 皓司 1968年，東北大学大学院工学研究科博士課程修了。東北大学助手，助教授，教授，客員教授を経て，現在，東北大学名誉教授，研究支援者。1990年~1998年，理化学研究所チームリーダーを兼任。ミリ波，テラヘルツ波帯デバイス・計測装置の研究開発に従事。1998年，K.J. Button Medal，2003年，文部科学大臣賞（研究功労者），2005年，IEEE MTT-S Distinguished Education Awardを受賞，IEEEフェロー，工学博士。