

# エアギャップとダミーパッチを利用した 広帯域ミリ波アレイアンテナ

電子応用技術 R&D センター Shailendra Kaushal<sup>1</sup>・官

寧<sup>2</sup>

## A Broadband Millimeter-wave Array Antenna by Using Air Gap and Dummy Patches

S. Kaushal, and N. Guan

ミリ波スモールセルアンテナモジュールで使用可能な、60 GHz帯域用広帯域ミリ波アレイアンテナを設計したので、ここで報告する。本アンテナにおいて、開口結合パッチアンテナが反転パッチを使用しており、グラウンド面とパッチの間にエアギャップが導入されている。また、高利得を確保するために、サブアレイには複数のパッチを使用しているが、広い帯域で安定した利得を得るために、端部に配置された複数のパッチには直接給電していないダミーパッチを用いる。アンテナの性能はエアギャップ、パッチの構成、および上部基板の厚さの各パラメータに依存するが、本論文において、エアギャップが調整され、アンテナの性能が比較されている。最適化したアンテナは 55 GHz ~ 65 GHz の帯域で良好な動作を示す。単一アレイアンテナは、同周波数帯で  $|S_{11}| < -10$  dB、ピーク利得が 10 dBi を超える非常にフラットな応答が得られている。また、16 個のサブアレイを組み合わせて広範囲なビームフォーミングが得られ、 $\pm 50$  度の範囲で変動が 3 dB 以下のビームスキャンを実現している。

In this paper a broadband millimeter-wave array antenna has been designed at 60-GHz band to be used in millimeter-wave small cell antenna module. An aperture coupled patch antenna has been used with inverted patch and air gaps are introduced in between ground and patches. Some unfed patches (dummy patches) are applied for obtaining stable high gain in a broadband. The performance of the antenna is dependent on the air gap, dummy patches and the thickness of the upper substrate. The air gap has been tuned and the performance has been compared. The antenna shows 55 GHz to 65 GHz bandwidth for  $|S_{11}| < -10$  dB and very flat peak gain w.r.t. frequency for a single antenna. Peak gain for the single array is obtained 10 dBi. Beamforming with 16 such antennas has been shown to steer the beam  $\pm 50$  deg at a low variation less than 3 dB.

### 1. ま え が き

ライセンス不要な 60 GHz帯域は非常に広い周波数帯域をもち、限られた距離内にある 2 つ以上のワイヤレスデバイスを高速につなぐ手段を提供し、高速な短距離無線通信の促進に期待されている。その用途のミリ波通信端末には、全周波数範囲内で高スループットを実現するために、広帯域の高利得ビームフォーミングアンテナが必要である。その周波数帯域において、広帯域および高利得アンテナを設計し、試験を実施した報告は多くなされているが、開口結合アンテナは簡易な構造をもちながらその目的を達成できる有力な候補の一つである。論文 [1] はその一例で、そこではエアギャップを有しない多

層開口結合アンテナに基づいた 60 GHz帯域幅のアンテナ設計が示されており、利得こそ 26 dBi と非常に高いが、帯域幅は Wi-Gig 60 GHz バンドのみをカバーしている。また、論文 [2] では、PCB ベースのマイクロストリップリッジギャップ導波路および基板統合型導波路 (SIW) に基づいたアンテナは、非常に広帯域で高利得を示す  $2 \times 2$  アレイで設計されている。このアンテナは、良好な利得帯域幅を示しているが、構造が複雑であり、ビームフォーミングを適用するには大幅な修正が必要である。論文 [3] は、反射特性を向上させるためにエアギャップを適用した円偏波開口結合アンテナが提案され、特性に対する残留エアギャップの影響が研究されている。論文 [4] では、利得が 9 dBi、帯域幅が 20% となる 60 GHz トランシーバモジュール用アンテナが提案され、低コストで高効率のブロードバンド特性が示されている。

本論文では、パフォーマンスを向上させるために、グ

1 5G 無線デバイス開発部

2 5G 無線デバイス開発部 部長・フェロー (学術博士)

ランドとパッチの間にエアギャップがある開口結合アンテナの線形アレーを提案し、設計を行った。図 1 に示すように、パッチは厚い基板 2 の下側に設計され、その直下にエアギャップを設けてある。エアギャップの下側にはグラウンド面があるが、そこに「H」型の開口スロットがエッチングによって作成されている。給電線はグラウンド面の下側に設けてあり、給電された信号が開口スロットを介して上部にあるパッチアレーに転送される。

アレーアンテナは 8 つのパッチにより構成される (図 2)。中央のパッチは最大の電力が供給されるが、エッジ側のパッチに向かって給電電力が減少する。各端部に配置されている 2 つのパッチ (計 4 つ) は、安定した高利得を得るために直接給電されず、ダミーパッチとなっている。給電パッチ間との空隙は、開口スロットとパッチ間の結合損失を避けるために使用される。

## 2. アンテナの設計とシミュレーションの結果

### 2.1 アンテナ基板のレイアウトと寸法の最適化

図 1 はアンテナレイアウトを示すが、そこには 2 種類の基板を使用する。基板 1 は厚さ  $h_1$  (0.13 mm) および  $h_2$  (0.1 mm) の液晶ポリマー (LCP) であり、 $\epsilon_r=2.9$ ,  $\tan\delta=0.003$  となる。基板 2 は厚さ  $h_3$  (2 mm) の ULTEM-100 であり、 $\epsilon_r=3.5$ ,  $\tan\delta=0.00145$  となる。基板 2 はパフォーマンスの向上とともにグラウンド面とパッチ層の間に均一なエアギャップを維持するために厚くしてある。図 2 はアンテナの上面図を示す。すべてのパッチの下側には結合用スロットが刻まれているが、給電線が中央にある 4 つのパッチにしか配線されていない。そのために、中央にある 4 つのパッチは直接給電されるアクティ

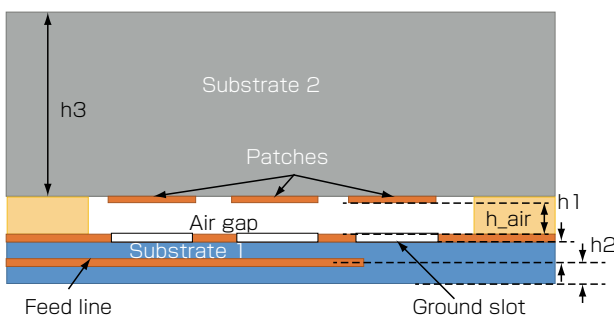


図 1 アンテナの断面図  
Fig. 1. Cross section view of antenna.

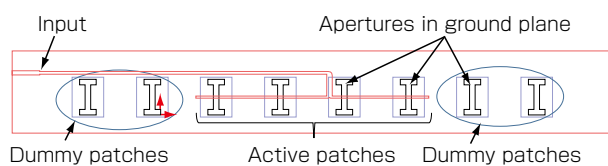


図 2 アンテナ設計の平面図  
Fig. 2. Top view of antenna design.

ブパッチであり、両端にある 4 つのパッチは直接給電されないダミーパッチとなっている。

グラウンド面にカットされたスロットは「H」字型で、パッチが基板 2 の下側に作成され、以下の寸法となる長方形の形状を有する。アンテナの幅「 $W_p$ 」と長さ「 $L_p$ 」の開始設計値はそれぞれ次の式で計算される：

$$Width = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_R+1}{2}}}; \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R+1}{2} + \frac{\epsilon_R-1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right]$$

$$Length = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left( \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \right)$$

それらの値は基板 2 の誘電率に基づき、良好なマッチングを得るために最適化される。

マイクロストリップ給電線は、厚さ  $h_1$  のグラウンド面の下に同材質で厚さ  $h_2$  の下に設置される。中央にあるアクティブパッチは同位相で放射させる必要があり、給電線はアンテナの両側で逆位相給電するように、中心に対して非対称となっている。給電線の分岐点では、インピーダンス整合させるために 4 分の 1 波長トランスが使用されている。

図 3 に示すアンテナの寸法は、 $L=22$ ,  $W=3$ ,  $L_p=1.45$ ,  $W_p=1.15$ ,  $La_1=0.9$ ,  $La_2=1.3$ ,  $Wa_1=0.6$ ,  $Wa_2=0.2$ ,  $L_1=11.66$ ,  $L_2=3.65$ ,  $L_3=4.9$ ,  $W_1=0.08$ ,  $W_t=0.22$ ,  $L_{stub}=0.75$ ,  $P=2.35$ ,  $W_{50}=0.1$ ,  $L_t=0.97$ , すべての単位は mm である。

アンテナは Ansoft 高周波構造シミュレーター HFSS でシミュレーションされ、周波数に関する反射係数と利得特性は図 4 に示す。図示のように、非常に広い帯域において安定したブロードサイド利得が得られ、最大 10 dBi となっている。アンテナのパッチは Y 方向の一直線に配置されているため、図 5 の放射パターンは、YZ 平面ではビームが狭く、XZ 平面では広いことを示している。

### 2.2 グラウンド面とパッチ間の空隙の影響

グラウンド面とパッチの間の空隙「 $h_{air}$ 」は、設計の堅牢性を評価するために、0.05 mm のステップで 0.25 mm から 0.40 mm まで変化させた。図 6 の反射係数と図 7 の利得特性は、「 $h_{air}$ 」のすべての値、すなわち、0.25 mm ~ 0.40 mm の任意の値で許容できる特性を有することを示している。

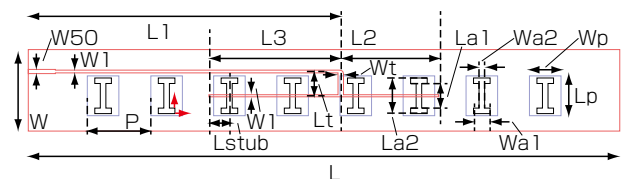


図 3 アンテナの寸法  
Fig. 3. Antenna dimensions.

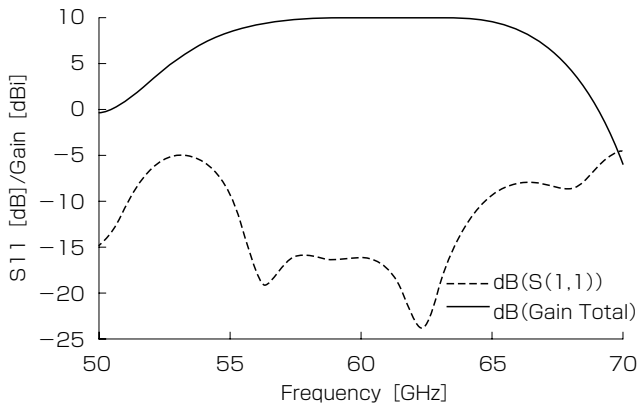


図4 アンテナSパラメータと利得の周波数特性  
Fig. 4. Antenna S-parameter and gain w. r. t frequency.

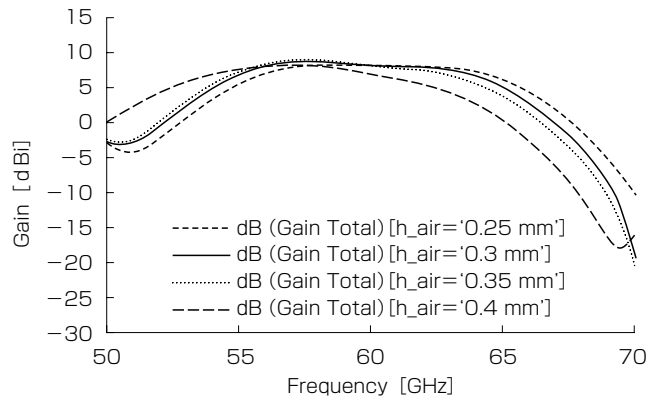


図7 h<sub>air</sub>に関するアンテナの利得  
Fig. 7. Gain of antenna with respect to h<sub>air</sub> at 60 GHz.

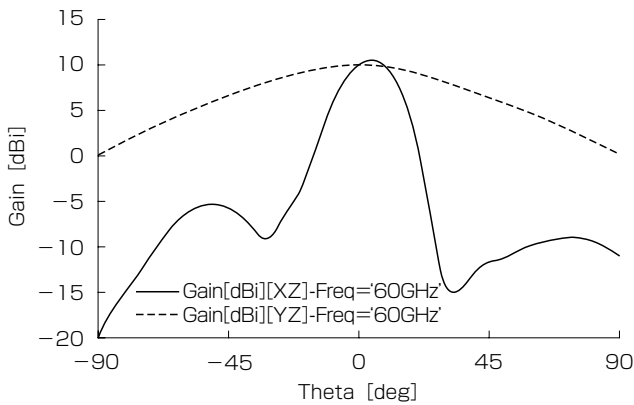


図5 ゲイン特性  
Fig. 5. Gain characteristics at 60 GHz.

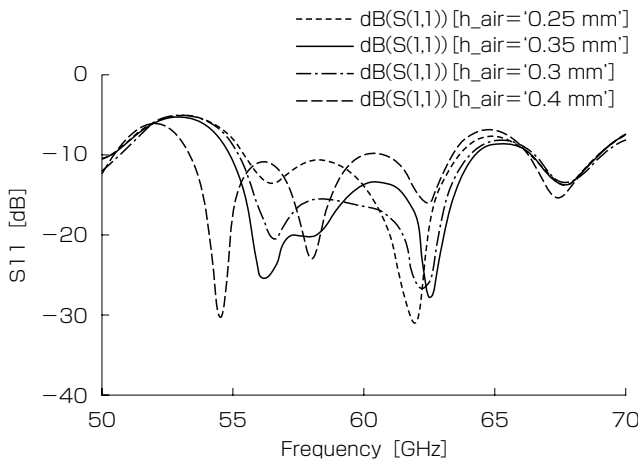


図6 h<sub>air</sub>に関する反射特性  
Fig. 6. Reflection characteristics with respect to h<sub>air</sub>.

2. 3 ダミーパッチの効果

このセクションでは、パッチを図8に示す以下の組み合わせに対してアンテナ特性を比較する：(a) 本論文で提案されている4つのアクティブパッチと4つのダミーパッチ、(b) 4つのアクティブと4つのダミーパッチ、ただしダミーパッチの下に開口スロットがない、(c) 8つ

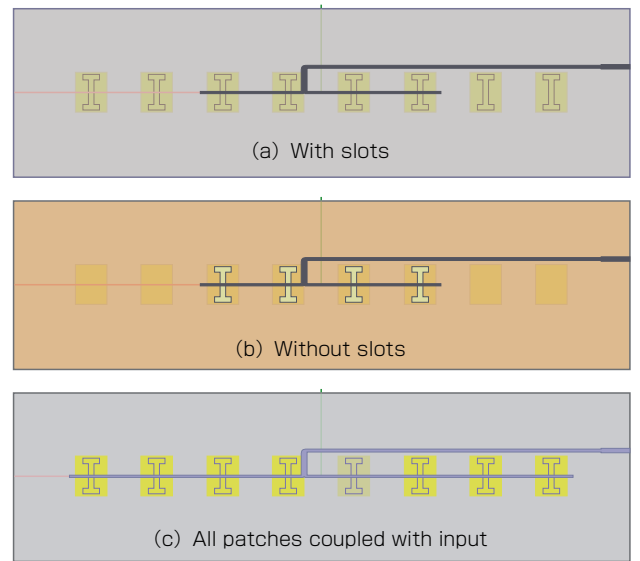


図8 パッチと給電が異なる組み合わせのアンテナ  
Fig. 8. Antenna with different combination of patch and feeding.

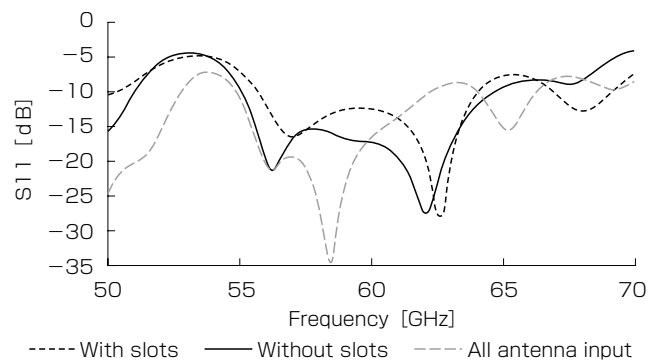


図9 |S11|の比較  
Fig. 9. Comparison of |S11|.

のパッチすべてが給電線に励起される。

図9に示すように、これら3つの組み合わせにおけるアンテナの反射係数は、-10 dB未満で良好なマッチ

ングを実現しているが、図 10 にプロットしたブロードサイド利得は、構成 (c) が提案構成の (a) と比較して非常に低い利得を与えることがわかる。図 11 はこれら 3 つのケースに関するグラウンド面の電流を示しているが、構成 (c) で最小であるとともに、構成 (a) ではダミーパッチの下の開口部の電流密度が他の 2 つ構成に比べて大きいことがわかる。これが、(a), (b), (c) の順序で利得が高くなっている理由である。

### 3. アンテナアレイのレイアウトとビーム形成

上記に提案されたサブアレーアンテナは、図 12 に示すように、2.5 mm (1/2λ) の距離で線形に配置され、ビームフォーミングアレーを形成できる。各サブアレーアンテナに給電する電流の位相と振幅を適宜に指定すれば、ビームの形状と方向を制御することができる。

すべてのアンテナに同じ振幅と位相が供給された場合、ビームの方向はブロードサイドになる。図 13 は、利得が 60 GHz で 22.3 dBi のピーク利得となる放射パターンを示し、周波数変化に対するブロードサイド利得は図 14

にプロットされて、20 dBi 以上と非常に安定していることがわかる。また、すべてのアンテナが同時に励起され、各サブアレーには -135°, -90°, 0°, 90°, 135° の段階的な位相シフトが与えられた場合、メインビームは

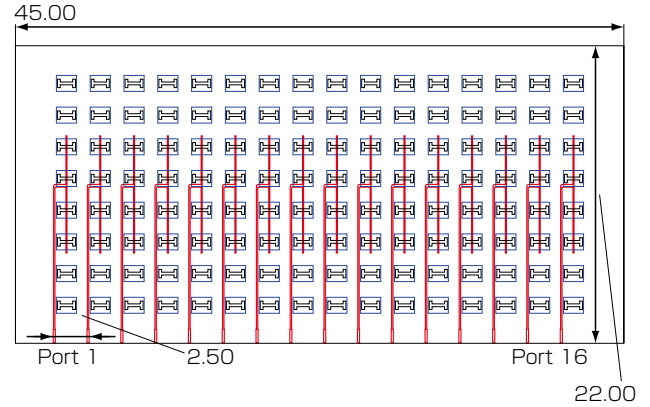


図 12 ビームフォーミングアレー  
Fig. 12. Beamforming array.

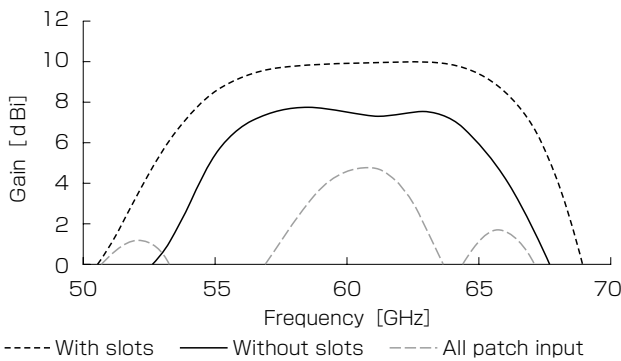


図 10 各構成における利得の比較  
Fig. 10. Comparison of gain for the three cases.

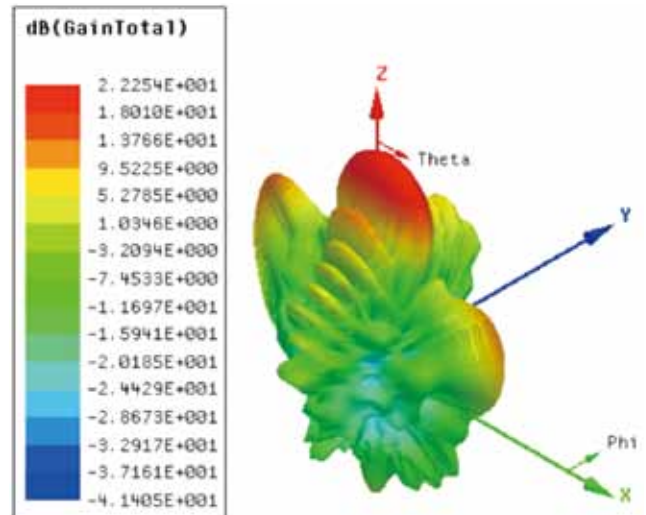


図 13 57 GHzでの 3 D放射パターン  
Fig. 13. 3D radiation pattern at 57 GHz.

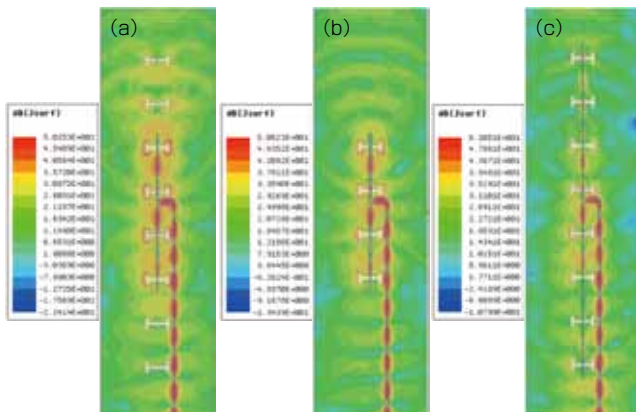


図 11 すべてのタイプのグラウンドプレーンの電流パターン

Fig. 11. Current pattern in the ground plane for these types at 60 GHz.

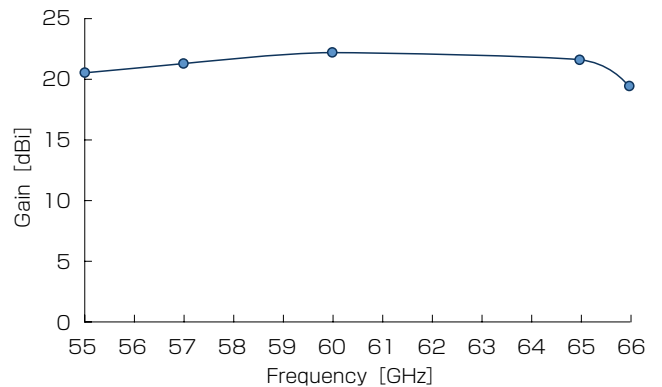


図 14 アレーのブロードサイドゲイン  
Fig. 14. Broadside gain of array.

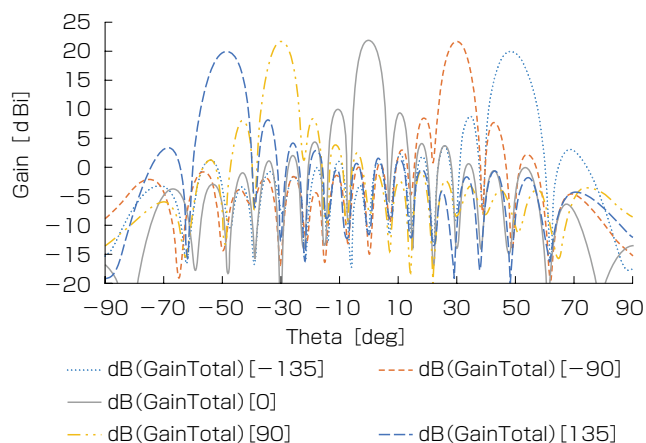


図15 アレイのビームフォーミング  
Fig. 15. Beamforming of array.

異なる方向に向けられる。たとえば、図15に示すように、メインビームは0°時のブロードサイド方向から、-135°時50°、-90°時-30°に向く。

#### 4. む す び

本論文において、60 GHzの広い周波数帯域において、よく整合し、安定した利得を有するサブアレーアンテナを提案した。単一アンテナでは、55 GHz～65 GHzの動作領域で8.5 dBiを超える利得を有する。また、複数の

アンテナを線形的に配置することにより、 $\pm 50^\circ$ の広い角度範囲内で変動が3 dB以下となる安定したビームフォーミング特性が得られており、ミリ波スモールセルのアンテナモジュールとして用いることができる。

#### 参 考 文 献

- 1) S. Kaushal, R. Yamamoto, K. Kobayashi and N. Guan, "Aperture coupled beamforming antenna array," *2018 IEEE Int'l Symp. on Antennas and Propagat. & USNC/URSI Nat. Radio Sci. Meeting*, pp.2183-2184, Boston, MA, 2018.
- 2) S. A. Razavi, P. Kildal, L. Xiang, H. Chen and E. Alfonso, "Design of 60 GHz planar array antennas using PCB-based microstrip-ridge gap waveguide and SIW," *The 8th European Conf. on Antennas and Propagat. (EuCAP2014)*, pp.1825-1828, Hague, 2014.
- 3) R. Sauleau and P. Coquet, "Influence of residual air gaps on characteristics of circularly polarised aperture-coupled millimetre-wave microstrip antennas," *Elect. Lett.*, vol.39, no.12, pp.889-891, June 2003.
- 4) M. Spella and A. de Graauw, "A low-cost high-efficiency broadband integrated antenna for 60-GHz transceiver modules," *2012 6th European Conf. on Antennas and Propagat. (EUCAP)*, pp.1271-1275, Prague, 2012.