#### **BAB IV**

### HASIL PENELITIAN ANTENA S-BAND DAN C-BAND

### 4.1 Studi Parametrik Desain *Slot* untuk Peningkatan *Bandwidth* S-band

Pada bab ini akan dijelaskan secara detail parametrik studi dan optimalisasi desain antena untuk mendapatkan nilai parameter koefisien refleksi S<sub>11</sub> yang baik pada nilai < -10 dB. Nilai ini secara umum dijadikan standar karena mencerminkan pencocokan impedansi yang efisien, di mana setidaknya 90% daya yang dipancarkan diteruskan ke antena dan hanya kurang dari 10% yang dipantulkan kembali, sebagaimana disarankan dalam literatur desain antena modern sesuai referensi dari antenna Theory Analysis and Design 4th Edition oleh Balanis (23). Ada 3 parameter *slot* yang akan dilakukan optimalisasi yaitu panjang *slot* (*Ls*), tebal slot (St) dan jarak slot (Hs). Gambar 4.1 menampilkan hasil simulasi dari parameter panjang *slot* (*Ls*) untuk ukuran panjang *slot*, dimana  $\lambda$  yang digunakan berdasarkan resonansi pada mode TE<sub>102</sub> dengan ukuran 64,85 mm dan hasil FBW sebesar 5,2%, nilai ini diperoleh dari rumus (2.11) untuk perhitungan panjang lamda untuk *slot*. Ketika  $Ls = \lambda$  dikalikan dengan 0,96, hanya menghasilkan FBW sebesar 2,6% dalam rentang 3,08 - 3,16 GHz. Kemudian, ketika dicoba  $Ls = \lambda$  dikalikan dengan 1,03, menghasilkan nilai FBW sebesar 3,7% dalam rentang frekuensi 3,22 - 3,34 GHz, dan yang terakhir dicoba  $Ls = \lambda$  dikalikan dengan 1,09 tidak mendapatkan nilai  $S_{11}$  yang baik pada < -10 dB.



Gambar 4.1 Simulasi koefisien refleksi untuk parameter Ls S-band

Eksperimen juga dilakukan pada parameter ketebalan *slot* (*St*), yaitu ketebalan *slot* cincin setengah oktagonal seperti yang ditampilkan pada **Gambar 4.2**. Hasil yang diperoleh untuk nilai FBW terbaik adalah dengan menggunakan ketebalan 3 mm (5,2%). Ketika menggunakan *St* = 3,4 mm, nilai FBW yang diperoleh adalah 4,6% dalam rentang frekuensi 3,19 - 3,34 GHz. Dan ketika *St* = 2 mm, nilai FBW yang diperoleh adalah 2,9% dalam rentang frekuensi 3,10 - 3,19 GHz, dan akhirnya ketika *St* = 1 mm, nilai FBW yang diperoleh adalah 2,3% (3,02 - 3,09 GHz).



Gambar 4.2 Simulasi koefisien refleksi untuk parameter St S-band

Pada *slot* cincin setengah oktagonal, parameter Hs diuji, yaitu posisi *slot* dari *feeding*, dimana hasil terbaik diperoleh pada Hs = 52,94 mm dengan hasil FBW 5,2% dalam rentang frekuensi 3,17 - 3,34 GHz. Juga dilakukan pengujian beberapa parameter lain: pada Hs = 52,64 mm, nilai FBW yang diperoleh adalah 3,1% (3,17 - 3,27 GHz), pada Hs = 53,24 mm, nilai FBW yang diperoleh adalah 1,2% (3,32 - 3,36 GHz), dan akhirnya ketika Hs = 53,54 mm diperoleh nilai S<sub>11</sub> yang tidak memenuhi kriteria -10 dB sesuai dengan hasil pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4.3 Simulasi koefisien refleksi untuk parameter Hs S-band

## 4.2 Analisa *Electric Field Distribution* (EFD) pada S-band

Sebuah studi mengenai EFD dilakukan untuk mengeksplorasi bagaimana mode TE berinteraksi dan memancar ke ruang bebas. **Gambar 4.4** menampilkan EFD untuk Ant-A pada 2,08 GHz. EFD untuk Ant-A tetap stabil pada 150 V/cm sepanjang satu periode untuk setiap peningkatan fase sebesar 45°. Pengamatan terhadap EFD yang disimulasikan pada Ant-A di **Gambar 4.4** menunjukkan pola distribusi listrik yang berbeda dibandingkan dengan **Gambar 4.5** yang diamati pada frekuensi 3,28 GHz, dan arah vektor juga berbeda saat diamati dengan fase internal 45°.



Gambar 4.4 EFD pada Ant-A di frekuensi 2.08 GHz dengan fase 0°, 45°, 90° dan 135°. (a) *front* patch, (b) back patch, (c) vektor E



Gambar 4.5 EFD pada Ant-A di frekuensi 3.28 GHz dengan fase 0°, 45°, 90° dan 135°. (a) *front* patch, (b) back patch, (c) Vektor E

Ant-C dapat menghasilkan frekuensi resonansi ganda, yang berasal dari kombinasi mode TE<sub>101</sub> dan TE<sub>102</sub>. Pada Ant-C, EFD diamati pada frekuensi 3,21 GHz, 3,26 GHz, dan 3,31 GHz dengan fase 0°, 90°, 180°, dan 270°, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.6**. Pada Ant-C, EFD tercatat pada 150 V/cm per periode, dengan pengukuran dilakukan pada interval fase 90°. EFD pada Ant-C pada 3,21 GHz muncul dari interaksi antara mode TE<sub>101</sub> yang kuat dan kombinasi mode TE<sub>102</sub> yang lebih lemah. **Gambar 4.6(a)** menggambarkan EFD awal pada 3,21 GHz. Intensitas medan listrik tertinggi di dalam HMSIW diamati sepanjang segmen horizontal, vertikal, dan segmen miring kanan dan kiri dari *slot* cincin setengah oktagonal. Di dalam HMSIW, distribusi ini muncul dari kombinasi mode TE<sub>101</sub> yang dominan dan mode TE<sub>102</sub> yang lebih lemah yang berada dalam fase yang sama. Frekuensi resonansi ganda kedua ditemukan pada 3,31 GHz, seperti yang digambarkan pada **Gambar 4.6(c)**. EFD tertinggi ditemukan di bagian atas dan

bawah *slot* cincin setengah oktagonal dalam HMSIW. Distribusi ini dihasilkan dari mode TE<sub>101</sub> yang lemah dan mode TE<sub>102</sub> yang kuat pada fase yang berbeda pada frekuensi 3,31 GHz. Selain itu, distribusi signifikan juga diamati di area penyisipan pemberian daya pada HMSIW.



Gambar 4.6 EFD Ant-C pada frekuensi (a) 3.21 GHz, (b) 3.26 GHz, (c) 3.31 GHz dengan fase 0°, 90°, 180° dan 270°

# 4.3 Fabrikasi dan Validasi Pengukuran Antena S-band

Antena yang diusulkan dibuat menggunakan proses *photo etching*, seperti yang ditampilkan pada **Gambar 4.7**. Antena ini diuji menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) untuk mengonfirmasi peningkatan *bandwidth* impedansi, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.8**. *Bandwidth* impedansi terukur untuk koefisien refleksi –10 dB adalah 180 MHz (berada dalam rentang 3,15 hingga 3,33 GHz), sedangkan *bandwidth* impedansi hasil simulasi adalah 170 MHz (dalam rentang 3,17 hingga 3,34 GHz). Menurut **Gambar 4.9**, *bandwidth* impedansi terukur menunjukkan hanya sedikit perbedaan dari nilai yang diharapkan,

kemungkinan disebabkan oleh faktor seperti proses fabrikasi antena, *vias shorting*, dan proses penyolderan konektor.



Gambar 4.7 Antena hasil fabrikasi (a) sisi patch, (b) sisi ground



Gambar 4.8 Pengukuran Radiation Pattern Antena S-band



Gambar 4.9 Simulasi dan pengukuran koefisien refleksi untuk antena yang diusulkan

Kinerja gain dari antena yang diusulkan dianalisis melalui simulasi dan pengukuran pada rentang frekuensi 3–3,6 GHz, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.10**. Hasil simulasi *gain* menunjukkan tren yang mulus dan konsisten, dengan puncak sekitar 5,75 dBi dalam pita operasi 3,1–3,2 GHz, yang mengonfirmasi eksitasi efektif dari mode TE<sub>101</sub> dan TE<sub>102</sub> dalam rongga HMSIW. *Gain* terukur (*realized*), meskipun menunjukkan fluktuasi yang lebih besar, secara bertahap meningkat dari nilai negatif pada frekuensi rendah dan mencapai puncak sekitar 6,63 dBi pada 3,31 GHz, sebelum menurun pada frekuensi yang lebih tinggi. Perbedaan antara hasil simulasi dan pengukuran disebabkan oleh faktor praktis seperti toleransi fabrikasi, rugi-rugi pada konektor, dan variasi lingkungan pengukuran. Meskipun demikian, konsistensi keseluruhan dalam *gain* puncak dan karakteristik frekuensi dari kedua data tersebut menegaskan sifat radiasi antena yang stabil dan terarah di seluruh rentang frekuensi S-band.



Gambar 4.10 Realized and simulasi gain Ant-C

## 4.4 Pengukuran Radiation Pattern Antena S-band

**Gambar 4.11** menyajikan pola radiasi ternormalisasi dari antena yang diusulkan berdasarkan hasil simulasi dan pengukuran pada frekuensi resonansi ganda, yaitu 3,21 GHz dan 3,31 GHz. Simulasi dilakukan pada bidang utama, yaitu bidang E-*plane* ( $\varphi = 0^\circ$ ) dan bidang H-*plane* ( $\varphi = 90^\circ$ ), yang masing-masing merepresentasikan arah broadside dan arah ortogonal dari antena. Hasil menunjukkan korelasi yang kuat antara simulasi dan pengukuran, khususnya pada

pola ko-polarisasi. Meskipun kedua bidang menunjukkan karakteristik arah yang serupa, terdapat sedikit penyimpangan pada arah utama pancaran. Variasi ini disebabkan oleh interaksi elektromagnetik di dalam rongga HMSIW, yang secara khusus dipengaruhi oleh distribusi medan listrik (EFD) pada slot cincin setengah oktagonal, sebagaimana telah diilustrasikan sebelumnya pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4.11 Simulasi dan pengukuran *radiation pattern* pada dua frekuensi (a) 3.21 GHz dan (b) 3.31 GHz

Berdasarkan hasil simulasi yang diamati pada frekuensi 3.21 GHz didapatkan hasil pola radiasi linier dengan bidang horizontal, dikarenakan ada nya pancaran energi ketika antena di letakkan secara horizontal. Namun tidak adanya energi atau sangat rendah ketika antena di letakkan secara vertical seperti **Gambar 4.12**.



Gambar 4.12 Pola Radiasi Pancaran antena secara horizontal dan vertikal

## 4.5 Studi Parametrik Desain *Slot* untuk Peningkatan *Bandwidth* C-band

Studi parametrik mendetail dilakukan untuk Ant-4 guna mengevaluasi pengaruh tiga parameter utama terhadap *bandwidth* impedansi antena dan koefisien refleksi (S<sub>11</sub>). Parameter yang dianalisis meliputi panjang *slot* (*Ls*), ketebalan *slot* (*Ws*), dan posisi *slot* (*Hs*) dari sisi atas *patch*. Setiap parameter diuji dengan empat nilai berbeda untuk menentukan konfigurasi yang menghasilkan *bandwidth* impedansi terluas.

Panjang *Slot* (*Ls*) Sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.13**, nilai-nilai panjang *slot* yang diuji adalah 17,5 mm, 21,9 mm, 26,15 mm, dan 28,0 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa panjang *slot* sebesar 26,15 mm memberikan kinerja optimal dengan rentang frekuensi 5,60 GHz hingga 6,71 GHz, menghasilkan *bandwidth* sebesar 1,11 GHz. Pada panjang *slot* yang lebih pendek, yaitu 17,5 mm dan 21,9 mm, resonansi frekuensi pertama bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, dan hanya satu resonansi yang diamati, menghasilkan *bandwidth* yang lebih sempit. Sebaliknya, pada panjang *slot* 26,15 mm dan 28,0 mm, antena menunjukkan karakteristik resonansi ganda akibat penggabungan mode TE<sub>101</sub> dan TE<sub>102</sub>. Namun, peningkatan panjang *slot* menjadi 28,0 mm justru mengurangi *bandwidth* secara signifikan menjadi 0,98 GHz, menunjukkan *detuning* dan *coupling* yang kurang efektif.



Gambar 4.13 Simulasi koefisien refleksi untuk parameter Ls C-band

Untuk ketebalan *Slot* (*Ws*) sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.14**, nilai ketebalan *slot* yang diuji adalah 0,1 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, dan 1,5 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketebalan *slot* sebesar 0,5 mm menghasilkan *bandwidth* terluas dengan rentang frekuensi 5,60 GHz hingga 6,71 GHz, menghasilkan *bandwidth* sebesar 1,11 GHz. Ketebalan *slot* sebesar 0,1 mm sedikit meningkatkan rentang frekuensi bagian bawah tetapi menunjukkan pencocokan impedansi yang buruk. Di sisi lain, peningkatan ketebalan menjadi 1,0 mm dan 1,5 mm mengurangi *bandwidth* menjadi 0,87 GHz dan 0,67 GHz secara berturut-turut, menunjukkan *coupling* yang lebih lemah dan peningkatan refleksi.



Gambar 4.14 Simulasi koefisien refleksi untuk parameter Ws C-band

Posisi *Slot* (*Hs*) sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.15**, posisi *slot* dari sisi atas *patch* divariasikan dengan nilai 2,5 mm, 3,45 mm, 3,95 mm, dan 4,25 mm. Kinerja terbaik dicapai dengan posisi *slot* sebesar 3,45 mm, memberikan rentang frekuensi 5,60 GHz hingga 6,71 GHz dan *bandwidth* sebesar 1,11 GHz. Memindahkan *slot* lebih dekat ke tepi atas dengan posisi 2,5 mm menghasilkan rentang frekuensi yang sedikit lebih luas tetapi menyebabkan pencocokan impedansi yang buruk pada frekuensi atas. Sementara itu, peningkatan posisi *slot* menjadi 3,95 mm dan 4,25 mm menyebabkan pengurangan *bandwidth* dan efisiensi *coupling* yang lebih rendah.



4.6 Analisa EFD pada C-band

Analisa EFD dilakukan untuk memahami interaksi mode TE dan bagaimana mode tersebut meradiasi ke ruang bebas. **Gambar 4.16** menunjukkan distribusi EFD untuk Ant-1 pada 6,79 GHz, Ant-2 pada 6,35 GHz, Ant-3 pada 5,96 GHz, dan Ant-4 pada 5,86 GHz. EFD pada antena-antenanya tetap konstan sebesar 100 V/cm untuk satu periode pada fase 0°.



Gambar 4.16. EFD frekuensi *center* pada fase 0° (a) Ant-1 di 6.79 GHz, (b) Ant-2 di 6.35GHz, (c) Ant-3 di 5.96 GHz, (d) Ant-4 di 5.86 GHz

Pada Ant-1, seperti terlihat pada **Gambar 4.17**, distribusi EFD yang disimulasikan pada fase 0°, 45°, 90°, dan 180° menunjukkan pola distribusi medan listrik yang berbeda pada frekuensi 6,79 GHz. Arah vektor medan listrik juga berubah secara signifikan pada fase internal 45°.Medan listrik tidak merambat di dalam *cavity* antena, melainkan lebih banyak terdistribusi pada *cavity* bagian bawah luar dan area *feeding* antena.



Gambar 4.17 EFD pada Ant-1

Untuk Ant-2, seperti terlihat pada **Gambar 4.18**, simulasi EFD pada frekuensi 6,35 GHz menunjukkan pola yang serupa dengan Ant-1. Distribusi medan listrik terutama teramati di area bawah luar dan *feeding*, dengan sedikit atau tidak ada propagasi di dalam *cavity*. Arah vektor berubah signifikan pada fase 45°, yang menunjukkan distribusi medan listrik yang asimetris akibat modifikasi HMSIW. Kurangnya interaksi medan listrik yang signifikan di dalam *cavity* membatasi eksitasi mode dengan urutan lebih tinggi, sehingga menghasilkan karakteristik resonansi tunggal dan *bandwidth* impedansi yang relatif sempit. Namun, asimetri ini meningkatkan pencocokan impedansi dibandingkan dengan Ant-1.



Gambar 4.18 EFD pada Ant-2

Pada Ant-3, seperti terlihat pada **Gambar 4.19**, simulasi EFD pada frekuensi 5,96 GHz menunjukkan peningkatan interaksi medan listrik di dalam struktur. Penambahan *slot* cincin setengah oktagonal meningkatkan propagasi medan listrik sepanjang sisi *slot* di dalam *cavity* antena, memungkinkan *coupling* yang lebih baik antara *slot* dan *cavity*. Modifikasi ini memperkenalkan karakteristik resonansi ganda melalui interaksi antara mode TE<sub>101</sub> dan TE<sub>102</sub>, yang membantu memperlebar *bandwidth* impedansi.



Gambar 4.19 EFD pada Ant-3

Medan listrik sebagian merambat ke dalam *cavity* bagian dalam dan juga terdistribusi di area *slot* cincin setengah oktagonal serta area *feeding*. Pola distribusi yang berbeda pada berbagai fase (0°, 45°, 90°, dan 180°) semakin menegaskan keberadaan karakteristik resonansi ganda ini. Namun, meskipun *bandwidth* impedansi lebih luas dicapai, distribusi medan listrik di dalam *cavity* tetap terbatas, yang berdampak pada performa *gain* secara keseluruhan.

Pada Ant-4, seperti terlihat pada **Gambar 4.20**, distribusi medan listrik yang disimulasikan pada frekuensi 5,86 GHz dan 6,29 GHz menunjukkan peningkatan interaksi medan listrik yang signifikan dibandingkan dengan desain sebelumnya. Medan listrik terkonsentrasi secara kuat di area *feeding*, *slot* cincin setengah oktagonal, dan *cavity* bagian bawah luar, yang memfasilitasi propagasi medan listrik yang lebih efektif dan meningkatkan coupling antara *slot* dan *cavity*. Modifikasi ini menghasilkan resonansi ganda yang terbentuk oleh mode TE<sub>101</sub> dan TE<sub>102</sub>, yang berkontribusi pada *bandwidth* impedansi yang lebih besar dibandingkan dengan Ant-3.



Gambar 4.20 EFD pada Ant-4 (a) pada 5.86 GHz, (b) pada 6.29 GHz

Analisis *cavity* bagian dalam menunjukkan bahwa resonansi pertama pada frekuensi 5,86 GHz didominasi oleh mode  $TE_{101}$  yang kuat dan mode  $TE_{102}$  yang lemah, sedangkan resonansi kedua pada 6,29 GHz didominasi oleh mode  $TE_{102}$  yang kuat dan mode  $TE_{101}$  yang lemah. Pada *cavity* bagian bawah luar, untuk kedua frekuensi 5,86 GHz dan 6,29 GHz, hanya mode resonansi  $TE_{101}$  yang diamati, konsisten dengan hasil pada Ant-1 dengan struktur FMSIW yang juga menunjukkan karakteristik resonansi tunggal. Pola distribusi yang berbeda pada berbagai fase (0°, 45°, 90°, dan 180°) semakin menegaskan keberadaan resonansi ganda ini. Distribusi medan listrik yang diperluas pada *cavity* bagian bawah luar, area feeding, dan *slot* cincin setengah oktagonal mendukung *bandwidth* impedansi yang lebih luas dan efisiensi radiasi yang lebih baik. Namun, performa gain tetap moderat karena radiasi tersebar pada beberapa mode, yang mengurangi *directivity*.

Menteng

## 4.7 Fabrikasi dan Validasi Pengukuran Antena C-band

Perbandingan koefisien refleksi S<sub>11</sub> hasil simulasi dan pengukuran untuk Ant-4 ditunjukkan pada **Gambar 4.21** dan **Gambar 4.22**. Hasil simulasi mencakup rentang frekuensi 5,60 GHz hingga 6,71 GHz dengan *bandwidth* impedansi sebesar 18%. Sementara itu, hasil pengukuran pada prototipe yang telah difabrikasi menunjukkan peningkatan *bandwidth* impedansi menjadi 19,4%, mencakup rentang frekuensi 5,82 GHz hingga 7,07 GHz. Perbedaan kecil antara hasil simulasi dan pengukuran ini disebabkan oleh toleransi fabrikasi, ketidakkonsistenan material, serta rugi-rugi pada konektor. Meskipun terdapat perbedaan, hasil pengukuran mengonfirmasi *bandwidth* impedansi yang lebar dan memvalidasi pendekatan desain yang digunakan.



Gambar 4.21 Antena Fabrikasi Ant-4, (a) Pengukuran S11, (b) Patch side, (c) Ground side

Antena Ant-4 yang diusulkan berhasil mencapai *bandwidth* impedansi lebar sebesar 19,4%, mencakup rentang frekuensi 5,82 GHz hingga 7,07 GHz pada

prototipe yang difabrikasi. Meskipun gain antena berada pada level moderat, yaitu 2,73 dBi, pola radiasi dua arah yang dimiliki antena ini memberikan cakupan yang serbaguna, cocok untuk aplikasi seperti jaringan area tubuh (*body area networks*) dan sistem komunikasi nirkabel. Hasil simulasi divalidasi melalui pengukuran koefisien refleksi dan pola radiasi, yang menunjukkan efektivitas desain ini.



Gambar 4.22 Simulasi dan Pengukuran S11 Antena Ant-4 C-band

Karakteristik polarisasi dari Ant-4 dievaluasi berdasarkan hasil simulasi rasio aksial (axial ratio/AR) pada rentang frekuensi 5 GHz hingga 7,5 GHz seperti terlihat pada **Gambar 4.23**. Rasio aksial mengukur perbandingan antara sumbu mayor dan sumbu minor dari vektor medan listrik dalam gelombang radiasi dan umum digunakan untuk membedakan antara polarisasi linear dan sirkular. Plot rasio aksial untuk Ant-4 menunjukkan nilai minimum sebesar 5,6 dB yang terjadi pada frekuensi 6,18 GHz. Secara umum, rasio aksial sebesar 3 dB atau lebih rendah menunjukkan polarisasi sirkular, sedangkan nilai yang jauh lebih tinggi dari 3 dB menunjukkan polarisasi linear. Karena rasio aksial terendah yang diamati pada Ant-4 adalah 5,6 dB, hal ini menegaskan bahwa antena beroperasi dengan polarisasi linear di seluruh pita frekuensi kerjanya.

Polarisasi linear yang diamati pada Ant-4 disebabkan oleh desain slot setengah oktagonal pada sisi patch. Geometri slot dan struktur rongga menghasilkan medan listrik yang berosilasi secara dominan pada satu bidang. Polarisasi linear ini konsisten pada frekuensi resonansi ganda 5,86 GHz dan 6,29 GHz, sehingga menjamin performa polarisasi yang stabil untuk aplikasi pita lebar.



Gambar 4.23 Axial Ratio Ant-4

### 4.8 Pengukuran Radiation Pattern Antena C-band

Pengukuran pola radiasi untuk Ant-4 dilakukan pada frekuensi 6,03 GHz dan 6,74 GHz. Seperti terlihat pada **Gambar 4.24**, komponen *co*-polarisasi (garis biru) dan *cross*-polarisasi (garis merah) yang diukur menunjukkan bahwa antena mempertahankan kemurnian polarisasi yang baik. Pada frekuensi 6,03 GHz, pola *co*-pol menunjukkan cakupan yang luas dengan beberapa karakteristik arah, sementara pola *cross*-pol tetap rendah, menunjukkan kebocoran polarisasi yang minimal. Demikian pula, pada frekuensi 6,74 GHz, pola *co*-pol menunjukkan performa yang stabil dengan *lobe* radiasi yang konsisten, dan *cross*-pol tetap tertekan. Hasil ini mengonfirmasi bahwa Ant-4 mencapai karakteristik resonansi ganda dengan kinerja radiasi yang efisien.



Gambar 4.24 Ant-4 Radiation Pattern measured (a) 6.03 GHz, (b) 6.74 GHz

Dibandingkan dengan studi sebelumnya, Ant-4 menawarkan keseimbangan yang baik antara *bandwidth*, *gain*, dan kompleksitas desain. Perbaikan di masa depan dapat diwujudkan melalui penerapan reflektor, konfigurasi *array*, atau penyempurnaan desain *cavity* untuk meningkatkan performa *gain* lebih lanjut.

