

Winter 2024, 5 (4), 123-128
DOR:

Received: 20 Oct 2024
Accepted: 1 Dec 2024

مقاله پژوهشی

Improving Microstrip Antenna Characteristics with Coaxial Feed Line Using Metamaterial Superstrate

Reza Khajeh Mohammadlou^{1*}, Mahdi Jalali²

1. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Miandoab Branch, Islamic Azad University, Miandoab, Iran. * *Corresponding Author*, re.khajehmohammadlou@iau.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Naghadeh Branch, Islamic Azad University, Naghadeh, Iran.

Abstract

Introduction: In this article, a microstrip antenna with high directivity, which includes one and two metamaterial super-layers, has been investigated. Metamaterial structures are alternating structures studied and researched by many researchers in recent decades due to their distinctive features such as super fracture phenomenon and negative relative electric and magnetic permeability. A patch antenna is used as a radiation source and Ansoft HFSS software is used for simulation. The results show that the gain, directivity, and bandwidth of the antenna with the metamaterial super-layer have increased in the frequency band (Ku) of 12-18 GHz. Compared with the conventional patch antenna with the same size of the radiation windows but without the metamaterial super layer, the efficiency of the microstrip antenna is improved.

Method: Parametric examination of the antenna is one of the main parts of the antenna design because it determines some characteristics of the antenna and optimal values. HFSS software is used to extract simulation results. In this section, the return loss, gain, and directivity of the antenna with metamaterial super layers, with different design parameters, have been studied.

Results: In short, in this article, a type of antenna with high gain and directivity using a metamaterial super-layer is presented. The simulation results show that the refractive index of the metamaterial super-layer is close to zero in a wide frequency band around 4 GHz, and the gain of the antenna has increased from 5.8 to 10.5 GHz in the Ku band. The maximum gain at the frequency of 15.23 GHz is about 12.5 dB using two layers of metamaterials.

Discussion: From the return loss curve, it can be seen that the bandwidth ($S_{11} \leq -10\text{dB}$) with a metamaterial super-layer is in the range of 13.5 to 18 GHz for a distance of $Ld1=10.8\text{ mm}$ from the metamaterial super-layer of the microstrip antenna patch, which is compared to the original strip antenna. Without the metamaterial super-layer, the bandwidth is increased to about 2 GHz. It is clear from the curve that the impedance bandwidth of the antenna is not significantly improved compared to the antenna with a super layer, except that the return loss has lower values than the previous structure. It is clear from the curve that the gain of the antenna with the use of a metamaterial super layer is significantly increased compared to the antenna without a super layer. The gain of the antenna with one metamaterial layer has increased by about 2 to 6 dB and for the antenna with two metamaterial layers by about 4 to 8 dB compared to the antenna without the metamaterial super layer. It is clear from the directionality pattern curve that with the presence of the metamaterial super layer the material of the antenna has been improved and its half-power beam width has been reduced. From the results shown, it is clear that the first metamaterial super layer has an effective role in improving the bandwidth, while the second super layer has a significant effect on the gain and directivity of the antenna.

Keywords: Microstrip antenna, metamaterial super-layer, super-refraction phenomenon, directivity, gain.

بهبود ویژگی‌های آنتن میکرواستریپ با خط تغذیه هم‌محور با استفاده از فوق‌لایه فرامواد

دوره پنجم، زمستان ۱۴۰۳
شماره چهارم، صص: ۱۲۳-۱۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

رضا خواجه‌محمدلو^{۱*}، مهدی جلالی^۲

۱ - استادیار، گروه برق، واحد میاندوآب، دانشگاه آزاد اسلامی، میاندوآب، ایران. (نویسنده مسئول)

re.khajehmohammadlou@iau.ac.ir

۲ - استادیار، گروه برق، واحد نقده، دانشگاه آزاد اسلامی، نقده، ایران.

Mahdi.jalali@iau.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک آنتن میکرواستریپ با سمت‌گرایی بالا که شامل یک و دو فوق‌لایه فرامواد برای کاربردهای باند Ku در سیستم‌های مخابراتی سیار مورد تحقیق قرار گرفته است. ساختارهای فرامواد، ساختارهای متناوب هستند که در دهه‌های اخیر به علت ویژگی‌های متمایز مانند پدیده فوق شکست و نفوذپذیری نسبی الکتریکی و مغناطیسی منفی، توسط محققان بسیاری مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته‌اند. آنتن‌های میکرواستریپ به‌خاطر داشتن ویژگی خصوصیات بارزی مانند هزینه ساخت مناسب و وزن کم در سیستم‌های بی سیم بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از معایب این آنتن‌ها بهره نامناسب آن است. یک آنتن پچ میکرواستریپ به عنوان منبع تشعشع استفاده شده است و نرم‌افزار Ansoft HFSS برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهره، سمت‌گرایی و پهنای باند آنتن با فوق‌لایه فرامواد در باند فرکانسی (Ku) ۱۲-۱۸ گیگاهرتز افزایش یافته است. در مقایسه با آنتن پچ متعارف با اندازه پنجره تشعشعی مشابه اما بدون فوق‌لایه فرامواد، کارایی و عملکرد آنتن میکرواستریپ به‌طور آشکاری بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: آنتن میکرواستریپ، فوق‌لایه فرامواد، پدیده فوق شکست، سمت‌گرایی، بهره.

۱. مقدمه

آنتن‌های سمتی با تنها یک نقطه تغذیه در عمل بسیار مورد توجه هستند. آنتن پچ متعارف مکانیسم تغذیه ساده‌ای دارد اما پترن تشعشعی آن توسط موج سطحی تحت‌تأثیر قرار گرفته و در نتیجه بهره پایین و پهنای باند باریکی دارد. از سوی دیگر آنتن‌های پچ آرایه‌ای می‌توانند ویژگی‌های سمت‌گرایی و بهره بالا را ارائه‌کنند، اما به علت مکانیسم تغذیه پیچیده و بازدهی تشعشعی، کاربردهای آن‌ها محدود هستند. بنابراین آنتن پهن‌بند با بهره و سمت‌گرایی بالا با ساختارهای متراکم و تغذیه ساده در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده‌است [۱-۲]. مواد مصنوعی جدید مانند فرامواد^۱ در طراحی آنتن‌ها به منظور افزایش کارایی و کاهش پروفایل مطرح شده‌اند [۳].

فرامواد ساختارهای مصنوعی هستند که معمولاً به صورت ساختارهای مرکب که از الگوهای فلزی متناوب بر روی یک زیرلایه دی‌الکتریک چاپ می‌شوند، ساخته می‌شوند. برخی از این ساختارهای فرامواد ضریب نفوذپذیری مغناطیسی^۲ منفی یا ضریب نفوذپذیری الکتریکی^۳ منفی از خود نشان می‌دهند. اگر هر دو ضرایب نفوذپذیری الکتریکی و مغناطیسی چنین ساختاری در یک فرکانس مشابه منفی باشند، ساختار ضریب شکست منفی برای محیط ایزوتروپیک دارد و فرامواد چپگرد نامیده می‌شود. علت این نامگذاری این است که بردارهای میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و عدد موج یک سیستم چپگرد را تشکیل می‌دهند [۴].

در سال‌های اخیر ساختارهای فرامواد مورد مطالعه و تحقیق بسیار در حوزه مایکروویو و آنتن‌های مخابراتی، به منظور بهبود پارامترهای آنتن‌های میکرواستریپ، قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۰۰ B.Temelkuan و همکارانش یک منبع تشعشعی منوپل را داخل یک حفره تشدید ساخته شده از کریستال‌های فوتونیک الکتریکی قرار دادند و یک سمت‌گرایی بالا به دست آوردند [۵].

S.Enoc و همکارانش یک نوع فرامواد را طراحی کردند که از شش شبکه ورقه مسی و از تکه‌های فوم به منظور تشعشع سمتی تشکیل یافته‌است. در آنتن آن‌ها یک منبع تشعشع منوپل مابین شبکه‌های سوم و چهارم قرار گرفته و نتایج تجربی نشان می‌دهد سمت‌گرایی آنتن افزایش یافته‌است [۶]. به علاوه A.R.Wiely و با قرار دادن یک فوق لایه از کریستال‌های فوتونیک بالای یک آنتن پچ متعارف یک تشعشع با سمت‌گرایی بالا به دست آوردند [۷].

در این مقاله یک نوع از آنتن با فوق لایه فرامواد با سمت‌گرایی^۴ بالا برای باند Ku مطرح شده‌است. ساختار فرامواد از پچ‌های مربعی شکافدار [۸] و زیر لایه مربوطه‌اش تشکیل شده که برای شبیه‌سازی یک محیط همگن با ضریب شکست پایین ($n \approx 0$) استفاده می‌شود و در مقابل منبع تغذیه قرار می‌گیرد. فاصله فوق لایه^۵ اول از آنتن در حدود نصف طول موج فرکانس کاری و فاصله لایه دوم از لایه اول بین یک چهارم طول موج و نصف طول موج فرکانسی کاری تنظیم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهره و پهنای باند آنتن با حضور فوق لایه

فرامواد بهبود یافته‌است و سمت‌گرایی آنتن به طور واضحی افزایش یافته‌است.

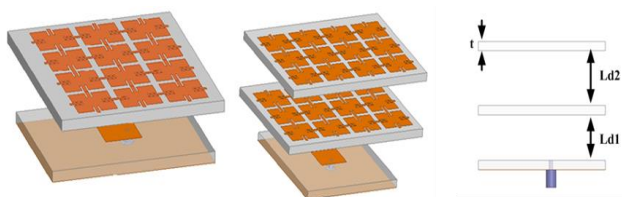
۲. آنتن میکرواستریپ با یک و دو فوق لایه فرامواد

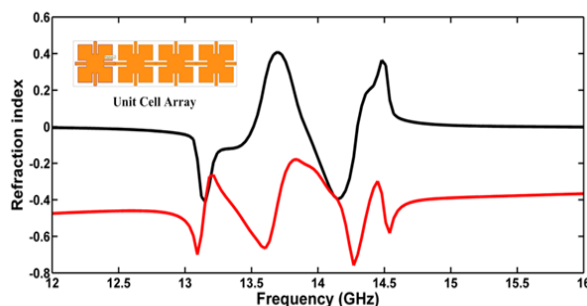
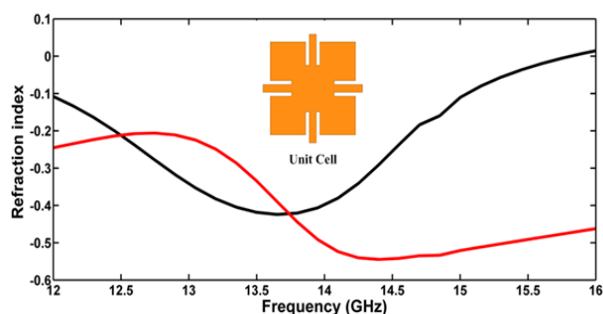
یک نمای کلی از آنتن میکرواستریپ با یک لایه و دو لایه فرامواد در شکل (۱) نشان داده شده‌است. ساختار فرامواد از یک و دو فوق لایه متشکل از پچ‌های مربعی شکافدار، ساخته شده‌است. فوق لایه فرامواد در بالای آنتن میکرواستریپ با پچ مربعی به ابعاد $5/6 \times 5/6$ میلی‌متر مربع که بر روی زیرلایه Roger RT/duroid با نفوذپذیری الکتریکی $2/2$ و ضخامت $1/575$ میلی‌متر چاپ شده، قرار گرفته‌است. پچ مربعی که به عنوان منبع تشعشع به کار می‌رود، با یک خط هم محور 50 اهم که $1/25$ میلی‌متر خارج از مرکز پچ مربعی قرار گرفته‌است، تغذیه می‌شود. اولین لایه فرامواد در حدود $L_{d1} = 10.8 \text{ mm}$ میلی‌متر بالای صفحه زمین و دومین لایه در حدود $L_{d2} = 12 \text{ mm}$ میلی‌متر از اولین لایه قرار گرفته‌است. مدل شبیه‌سازی شده یک پنجره تشعشعی به ابعاد 100×100 میلی‌متر مربع دارد و کل ضخامت آنتن با فوق لایه‌های فرامواد در حدود 23 میلی‌متر است.

۱.۲. طراحی فوق لایه فرامواد

فوق لایه فرامواد استفاده شده در شبیه‌سازی، از یک لایه و دو لایه شامل پچ‌های مربعی شکافدار و زیرلایه مربوطه‌اش تشکیل شده‌است. سلول واحد ساختار شکل (۲) نشان داده شده‌است. مطالعات تئوری و عملی نشان می‌دهد که چنین ساختاری می‌تواند به عنوان یک محیط همگن با فرکانس پلاسما پایین در نظر گرفته شود [۹-۱۱]. برای به دست آوردن پارامترهای مؤثر سلول واحد (شامل ضریب شکست و نفوذپذیری الکتریکی و مغناطیسی)، ساختار پچ مربعی شکافدار در داخل یک موجبر مستطیلی به منظور استخراج پارامترهای پراکندگی، قرار گرفته‌است. سطوح بالایی و پایینی موجبر شرایط مرزی هادی الکتریکی کامل دارند در حالی که سطوح چپ و راست شرایط مرزی هادی کامل مغناطیسی و سطوح جلویی و عقبی موجبر شرایط مرزی باز را دارند که پورت موجبری در این سطوح قرار گرفته‌اند. با استفاده از داده پراکندگی به دست آمده از موجبر، می‌توانیم پارامترهای مؤثر سلول واحد در تمامی فرکانس‌ها بازیابی کرد [۱۲]. ابعاد بهینه سلول واحد برای داشتن ضریب شکست نزدیک صفر در باند Ku به صورت زیر است:

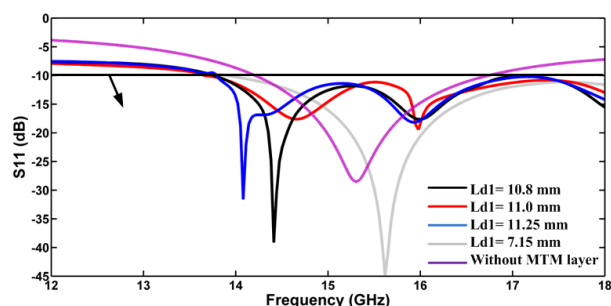
$$W_b = 6.3 \text{ mm}, L_b = 7.2 \text{ mm}, h_b = 7.2 \text{ mm}, W_{u1} = 2.5 \text{ mm}, W_{u2} = 2 \text{ mm}, W_{u3} = 0.5 \text{ mm}, L_{u1} = 0.25 \text{ mm}$$





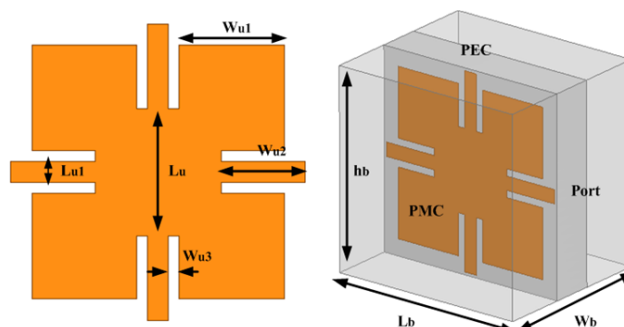
شکل ۳: نمودار ضریب شکست (الف) سلول واحد (ب) آرایه 4×1 از سلول واحد

شکل ۴ منحنی افت برگشتی آنتن میکرواستریپ با تغذیه خط هم‌محور با یک لایه فرامواد را نشان می‌دهد. از منحنی افت برگشتی مشاهده می‌شود که پهنای باند ($S_{11} \leq 10\text{dB}$) با یک لایه فوق لایه فرامواد در محدوده $13/5$ تا 18 گیگاهرتز برای فاصله $L_{d1} = 10.8\text{ mm}$ فوق لایه فرامواد از پچ آنتن میکرواستریپ قرار گرفته است که نسبت به آنتن میکرواستریپ بدون فوق لایه فرامواد در حدود ۲ گیگاهرتز پهنای باند افزایش یافته است. در شکل ۵ منحنی افت برگشتی آنتن با دو لایه فرامواد نشان داده شده است. از منحنی مشخص می‌باشد که پهنای باند امپدانس آنتن نسبت به آنتن با یک فوق لایه بهبود قابل ملاحظه‌ای ندارد جز اینکه افت برگشتی مقادیر کمتری نسبت به ساختار قبلی دارد.



شکل ۴: افت برگشتی آنتن میکرواستریپ با یک فوق لایه فرامواد در مقایسه با آنتن بدون فوق لایه

شکل ۱: آنتن میکرواستریپ با فوق فرامواد (الف) با یک لایه (ب) با دو لایه (ج) نمای جانبی



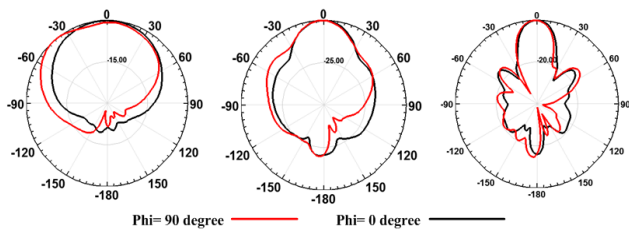
شکل ۲: ساختار سلول واحد پچ مربعی شکافدار

ضریب شکست ساختار پچ مربعی شکافدار در شکل ۳ نشان داده شده است. با استفاده از روش مشابه، پارامترهای مؤثر محیط برای یک آرایه 4×1 از ساختارهای پچ مربعی شکافدار، به دست می‌آید که در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌کنیم که ضریب شکست در محدوده فرکانسی $13/5$ تا $17/5$ گیگاهرتز نزدیک صفر است. بنابراین در این محدوده انتظار می‌رود پدیده فوق شکست رخ دهد که باعث می‌شود انرژی تشعشعی در جهت عمود به ساختار فرامواد متمرکز شود.

۲.۲. طراحی آنتن و بررسی پارامتری نتایج آن

بررسی پارامتری آنتن یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های طراحی آنتن است زیرا برخی مشخصات آنتن و مقادیر بهینه را مشخص می‌نماید. برای استخراج نتایج شبیه‌سازی از نرم‌افزار HFSS استفاده شده است. در این بخش افت برگشتی، بهره و سمت‌گرایی آنتن با فوق لایه‌های فرامواد، با پارامترهای طراحی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

بررسی پارامتری آنتن یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های طراحی آنتن است زیرا برخی مشخصات آنتن و مقادیر بهینه را مشخص می‌نماید. برای استخراج نتایج شبیه‌سازی از نرم‌افزار HFSS استفاده شده است. در این بخش افت برگشتی، بهره و سمت‌گرایی آنتن با فوق لایه‌های فرامواد، با پارامترهای طراحی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.



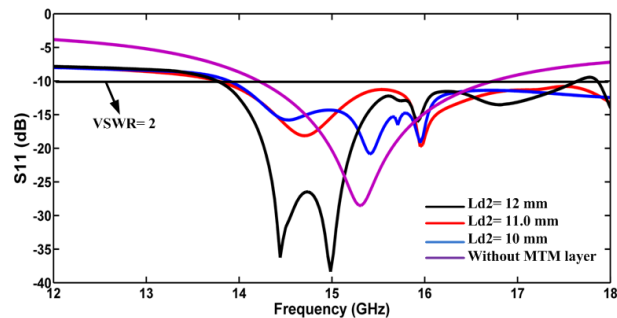
شکل (۷): الگوی تشعشعی آنتن میکرواستریپ (الف) بدون فرامواد (ب) یک لایه فوق لایه فرامواد (ج) دو لایه فوق لایه فرامواد

۳. نتیجه

به طور خلاصه، در این مقاله یک نوع آنتن با بهره و سمت گیری بالا با استفاده از فوق لایه فرامواد ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که فوق لایه فرامواد ضریب شکست در یک باند فرکانسی پهن در حدود ۴ گیگا هرتز، نزدیک صفر است و بهره آنتن ۸/۵ تا ۱۰/۵ گیگاهرتز در باند Ku افزایش یافته است. حداکثر بهره در فرکانس ۱۵/۲۳ گیگاهرتز حدود ۱۲/۵ دسی بل با استفاده از دو لایه فرامواد حاصل می شود.

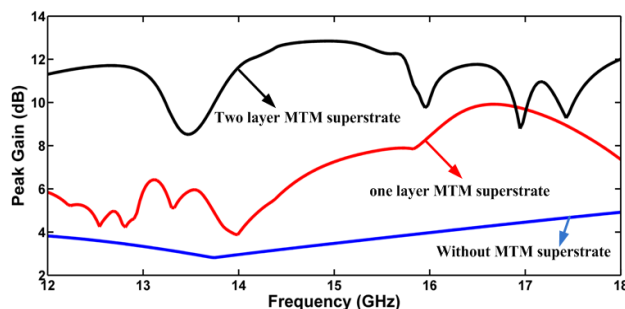
References

- [1] X.Huiliang, Z.Zhao, L.Yueguang, D.Chunlei and Xiangang Luo, "metamaterial superstrate and electromagnetic band-gap substrate for high directive antenna", Int Infrared Milli Waves Journal, Vol. 29, pp. 493-498, 2008
- [2] J Sadeghzadeh, R. A., Reza Khajehmohammadlou, and Mahdi Jalali. "A novel high directive EBG structure and metamaterial superstrate for microstrip antenna." *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies* 4.2 (2013): 1-12.
- [3] D.Sievenpiper, L.Zhang, F.J.Broas, N.G.Alexopolous and E.Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. Journal, Vol. 47, pp. 2059-2074, 1999
- [4] V.G.Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", Soviet Physics Uspekhi Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 509-514, 1968
- [5] B.Temelkuran, M.Bayindir, E.Ozbay, R.Biswas, M.M.Sigalas, G.Tuttle and K.M.Ho, "Photonic crystal-based resonant antenna with a very high directivity", Applied Physics Journal, Vol. 87, pp. 603-605, 2000
- [6] S.Enoch, G.Tayeb, P.Sabouroux and P.Vincont, "A metamaterial for directive emission", Physical Review Letters, Vol. 89, No. 21, 2002
- [7] A.R.Weily, L.Horvath, K.P.Esselle, B.C.Sanders and T.S.Bird, "A planar resonator antenna based on a woodpile EBG material", IEEE Trans. on Antennas and Propag, Vol. 53, pp. 216-223, 2005
- [8] B.-I. Wu, W. Wang, J. Pacheco, X. Chen, T. Grzegorzczuk and J. A. Kong, "A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain", Progress In Electromagnetics Research Journal, VOL. 51, pp. 295-328, 2005
- [9] C.H.Tsao and J.L.Chern, "Field propagation of a metallic grid slab that act as a metamaterial", Physics Letters , pp. 171-178 , 2006



شکل ۵: افت برگشتی آنتن میکرواستریپ با دو لایه فرامواد در مقایسه با آنتن بدون فوق لایه

منحنی بهره ماکزیمم آنتن یا با یک فوق لایه، دو فوق لایه و بدون فوق لایه فرامواد در شکل ۶ نشان داده شده است. از منحنی کاملاً مشخص است که بهره آنتن با استفاده از فوق لایه فرامواد در مقایسه با آنتن بدون فوق لایه افزایش چشمگیری دارد. بهره آنتن با یک لایه فرامواد در حدود ۲ تا ۶ دسی بل و برای آنتن با دو لایه فرامواد در حدود ۴ تا ۸ دسی بل نسبت به آنتن بدون فوق لایه فرامواد افزایش یافته است. در شکل ۷ الگوی تشعشعی^۸ سمت گرایی آنتن در پیکربندی های مختلف نشان داده شده است. از منحنی الگوی تشعشعی سمت گرایی کاملاً مشخص است که با حضور فوق لایه فرامواد سمت گرایی آنتن بهتر شده و پهنای بیم نیم توان آن کاهش یافته است. از نتایج کاملاً مشخص است که اولین فوق لایه فرامواد در بهبود پهنای باند نقش مؤثری دارد در حالی که فوق لایه دوم در بهبود بهره و سمت گرایی آنتن تاثیر قابل ملاحظه ای دارد.



شکل ۶: بهره ماکزیمم آنتن میکرواستریپ با پیکربندی های مختلف

- [12] M. Jalali, T. Sedghi and M. Shokri, "A novel metamaterial SRR for waveguide antenna," *2009 Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Tangiers, Morocco, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/MMS.2009.5409804.
- [10] J.B.Pendry, A.J.Holden, W.J.Stewart and I.Youngs, "Extremely low frequency plasmas in metallic mesostructures", *Physical Review Letters*, Vol. 76, pp. 4773-4776, 1996
- [11] L. Chen, Z. Lei, R. Yang, X. Shi and J. Zhang, "Determining the effective electromagnetic parameters of bianisotropic metamaterials with periodic structures", *progress In Electromagnetics Research*, Vol. 29, pp. 79-93, 2013

پی‌نوشت

⁵Superstrate

⁶Return Loss

⁷Gain

⁸Radiation Pattern

¹Metamaterial

²Magnetic Permeability

³Electric Permittivity

⁴Directivity