

文章编号: 2095-4980(2021)02-0281-05

Ka 频段阵列天线的去耦结构设计

周媛, 江肖力, 韩威, 魏浩

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 设计了一种应用于 Ka 频段的新颖去耦结构, 分析该结构去耦效果。通过建立“d”形共面紧凑型电磁带隙(UC-EBG)结构的等效电路模型, 化简分析得到其带阻滤波特性。基于保角变换和椭圆积分计算去耦结构的分布参数, 等效电路仿真结果与去耦结构仿真相一致。将该去耦结构用于阵列天线, 提高了阵元间的隔离度, 降低了阵元互耦效应。

关键词: 阵列天线; 玻璃介质基板; 去耦; 等效电路

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019465

Design of Ka band array antenna decoupling structure

ZHOU Yuan, JIANG Xiaoli, HAN Wei, WEI Hao

(The 54th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

Abstract: The purpose of this paper is to design a new type of decoupling structure for Ka band and to analyze the decoupling effect of this structure. The equivalent circuit model of the “d-shaped” Uniplanar Compact Electromagnetic Band Gap(UC-EBG) structure is established, and its band-stop filter characteristics are obtained through simplified analysis. The distribution parameters of the decoupling structure are calculated based on the conformal transformation and elliptic integral calculation. The simulation results of the equivalent circuit are consistent with the simulation of the decoupling structure. Applying this decoupling structure to the array antenna improves the isolation between array elements and reduces the mutual coupling effect of array elements.

Keywords: antenna arrays; glass dielectric substrate; decoupling; equivalent circuit

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)天线技术使得信道容量成倍增加, 从而提高了数据传输速率, 具有广阔的应用前景^[1-3]。但 MIMO 天线系统的发展也带来了天线单元间电磁干扰问题, 天线单元间互耦效应导致的表面波会恶化天线性能, 如辐射方向图、工作带宽等^[4-6]。因此寻找合适的去耦方案, 提高阵列天线性能成为研究热点^[7-9]。常见的去耦方法有 3 种: a) 场对消方法。通过添加一些结构, 改变阵列天线布阵方式, 引入与原有耦合场相反的另一耦合场与原有耦合场对消, 常用于线极化天线; b) 带阻滤波方法。在天线间添加带阻滤波结构, 利用带阻滤波结构在工作频率产生传输阻带, 从而有效减小或抵消天线间的耦合效应, 达到去耦目的; c) 去耦网络。在馈电端口和耦合天线之间插入传输线网络。虽然去耦网络不同, 但它们的间接耦合场均由天线的馈电网络来完成。其中, 电磁带隙(EBG)结构是近年来阵列天线去耦研究中的热点。EBG 结构是一种周期性结构, 利用其表面波带隙特性抑制天线单元间表面波的传播, 从而减小线元之间的互耦效应, 提高天线单元间的隔离度, 利于天线阵列方向图综合等。

2017 年, 文献[5]提出一种利用一排不规则平面紧凑型 EBG 结构和 3 个交叉槽实现阵列天线的高隔离度, 其仿真结果表明天线单元间隔离度提高了 13 dB, 同时地面刻蚀三交叉槽结构可以提高抑制互耦效应的能力, 隔离度提高 16 dB。但该文献中的 UC-EBG 结构复杂, 优化过程繁琐。同年, 文献[10]设计了一种工作于 5.59 GHz 的 UC-EBG 结构, 用于减小微带天线阵阵元间互耦效应。该结构简单, 容易优化及加工, 并且改善了 2 个天线间隔离度, 隔离度最优值提高至 34 dB。文献[11]中采用正方形高阻抗表面作为去耦结构, 明显降低了阵元之间的耦合, 耦合度降低了 5 dB 左右。蘑菇状 EBG 结构, 需要进行打孔, 可用于阵元间距较大的阵列天线, 而 UC-EBG 更适用于阵元间距小, 无法进行打孔接地的阵列天线中。

收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2020-01-06

作者简介: 周媛(1993-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理。email:976092229@qq.com

1 阵列天线设计

1.1 天线单元设计

矩形微带贴片天线的谐振频率通常由式(1)近似计算:

$$f \approx \frac{c}{2L\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}} \quad (1)$$

式中: ϵ_r 为介质基板的相对介电常数; L 为微带贴片的长度; c 为真空中光的传播速度^[12]。在 Ka 频段, 天线阵列常选用低温共烧陶瓷、玻璃作为介质基板。本文选用玻璃, 玻璃介质作为天线衬底的同时还可实现与硅集异质互连, 玻璃介质的相对介电常数为 5.1, 厚度为 300 μm , 中心频率为 40 GHz, 通过计算得到贴片天线的长度约为 2.15 mm, 在电磁软件中仿真优化后得到天线的辐射单元尺寸为 1.58 mm \times 2.7 mm。

1.2 阵列天线设计及仿真

为实现 $\pm 45^\circ$ 扫描, 设计了 1×4 线性阵列天线, 输入端口相位差为 135° , 根据式(2)得到天线间距为 4 mm。考虑到扫描时阵列天线的阻抗变化, 将阵元间距进行缩小, 通过 HFSS 软件进行仿真优化。输入端口相位差为 135° 时, 间距仅为 $45.33\% \lambda$ 才可实现 $\pm 45^\circ$ 扫描。

$$\varphi = \frac{360 \times d \times f}{c \times \sin\left(\frac{2\pi}{360} \times \theta\right)} \quad (2)$$

由于小型化设计要求, 打孔工艺受限, 因此选择侧馈形式。阵列天线模型见图 1。辐射贴片尺寸为 $x_1 \times y_1 = 2.59 \text{ mm} \times 1.54 \text{ mm}$, 阻抗匹配线为 $x_2 \times y_2 = 0.1 \text{ mm} \times 1.02 \text{ mm}$, 馈电微带线为 $x_3 \times y_3 = 0.5 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$ 。为便于进行加工测试, 在馈电端口最外侧进行裁剪, 裁剪后尺寸为 0.5 mm \times 1.7 mm。

阵列天线仿真结果见图 2, 阵列天线的耦合效应严重, 有源驻波比很差, 有源驻波比 ≤ 3 对应的天线带宽为 39.9~40.8 GHz, 相对带宽为 2.23%, 而隔离度最好为 13.8 dB。 1×4 阵列天线的天线单元 2 存在来自于天线 1 和天线 3 的耦合效应; 天线 3 同理, 因此端口 2 和端口 3 的有源驻波比高于端口 1 和端口 4。同时, 天线 2 和天线 3 间的端口隔离度最差, 40 GHz 下端口 2 和端口 3 的隔离度为 12.5 dB。

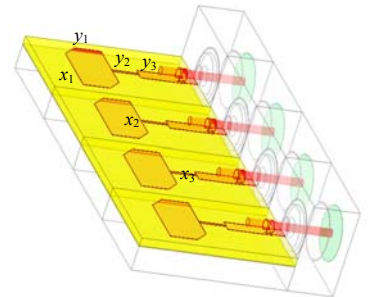


Fig.1 Side-feed antenna array
图 1 侧馈天线阵

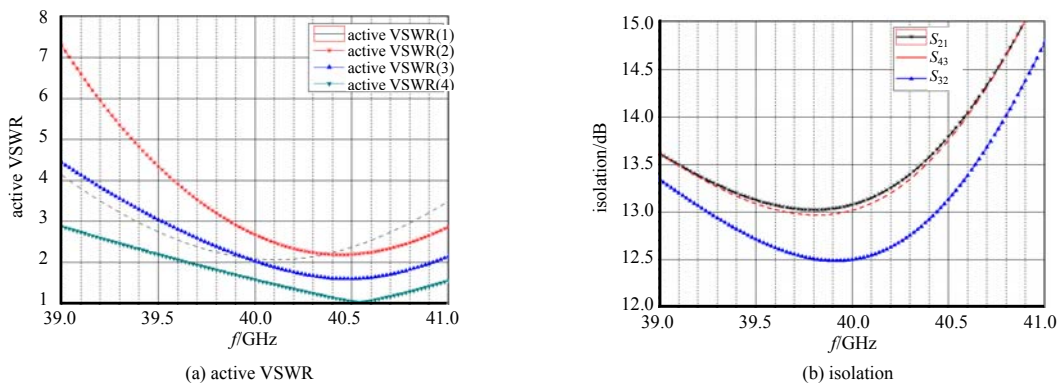


Fig.2 Simulation results of linear array antenna
图 2 线阵仿真结果

该阵列天线的耦合效应明显, 无法用于工程研究。天线单元间距仅为 3.4 mm, 无法添加屏蔽墙结构, 打孔工艺也无法实现。

2 去耦结构设计

该线阵的阵元间距仅为 3.4 mm, 而辐射贴片最近距离为 0.8 mm, 受打孔工艺限制, 只能选择平面紧凑型去耦结构。“d”形谐振结构是一种实用的弱谐振结构, 结构简单, 带宽较宽。

2.1 全波仿真分析

对该结构进行全波仿真分析其电磁特性。电磁波沿 y 方向入射，理想磁壁置于 x 轴方向，理想电壁置于 z 轴方向，保证激励“d”形结构的电响应。单元结构尺寸为： $X_1=0.3\text{ mm}, Y_2=0.6\text{ mm}, Z_1=1.5\text{ mm}, a_1=0.6\text{ mm}, a_2=0.6\text{ mm}, a_3=0.08\text{ mm}, l_1=0.46\text{ mm}, l_2=0.5\text{ mm}, l_3=0.34\text{ mm}, l_4=0.31\text{ mm}$ 。金属厚度为 0.01 mm ，结构刻蚀在厚度为 0.3 mm ，介电常数为 5.1 的介质板上。传输特性曲线如图 4 所示，“d”形结构的谐振频率为 40.3 GHz ，对应的波长为 7.5 mm ，而结构单元尺寸为 $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ ，满足亚波长条件(亚波长是指结构的特征尺寸与工作波长相当或更小的周期或非周期结构)。

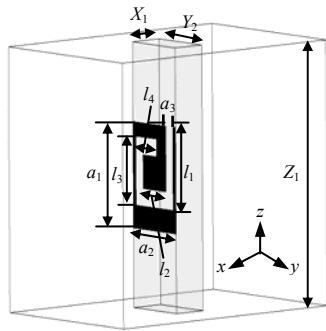


Fig.3 Equivalent parameter extraction model
图 3 等效参数提取模型

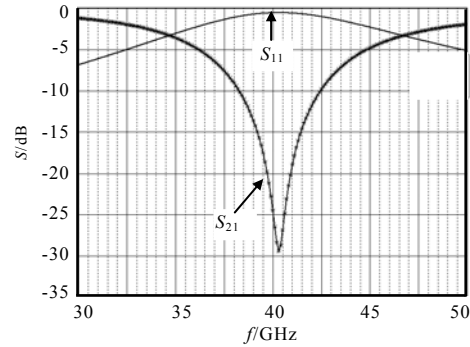


Fig.4 Transmission characteristic curves
图 4 传输特性曲线

该“d”形去耦结构是一种弱谐振结构，在 $39.2\sim 41.5\text{ GHz}$ 范围内， $S_{21} \leq -15\text{ dB}$ ，在非谐振频段内参数的值变化非常缓慢，有很宽的去耦频段。

2.2 等效电路分析

相邻天线单元间的去耦结构产生带隙的机理源自单元自身的谐振特性。结合场分析与电路分析理论，提取了“d”形 UC-EBG 结构的等效电路，如图 5 所示。阵列天线在工作时，从天线 1 看向天线 2，电磁表面波会在天线单元间传播，导致在“d”形 UC-EBG 结构单元中，金属贴片上积累感应电荷，在贴片间隙处产生压降，可等效为电容，在短截线上连通电荷，可等效为电感。

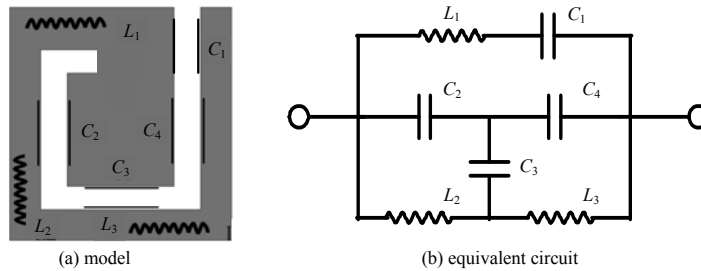


Fig.5 Decoupling structure of d-shape UC-EBG
图 5 “d”形 UC-EBG 去耦结构

等效电路包含 4 个电容，3 个串联电感。 C_1 与 L_1 串联后再与 C_2, C_4 并联， C_2, C_3 和 C_4 交于一点，再与 C_3 和 L_2 组成三角形拓扑结构，通过基尔霍夫定律进行三角形拓扑结构到 Y 型拓扑结构的转化，得到转化后电路，如图 6(a)所示，图中阻抗值、容抗值如式(3)所示。

$$M = -\omega^2 L_2 C_3 C_2 + C_2 + C_3; \quad L' = \frac{L_2 C_3}{M}; \quad C' = M; \quad L'' = \frac{L_2 C_2}{M} \quad (3)$$

转化后的电路可以清晰地看到电容串并联关系，通过计算推导，得到初步简化后的电路图，如图 6(b)所示。为方便表示，采用 A 表示初步简化后的电容值， B 表示初步简化后的电感值，图中所示各集总元件容抗值、感抗值如式(4)所示。最终化简电路图如图 6(c)所示。

$$A = \frac{C_4 M}{C_4 + M}; \quad B = L'' + L_3; \quad L_L = L' + \frac{B}{1 - \omega^2 A B}; \quad C_C = \frac{1 - \omega^2 L_1 C_1}{C_1} \quad (4)$$

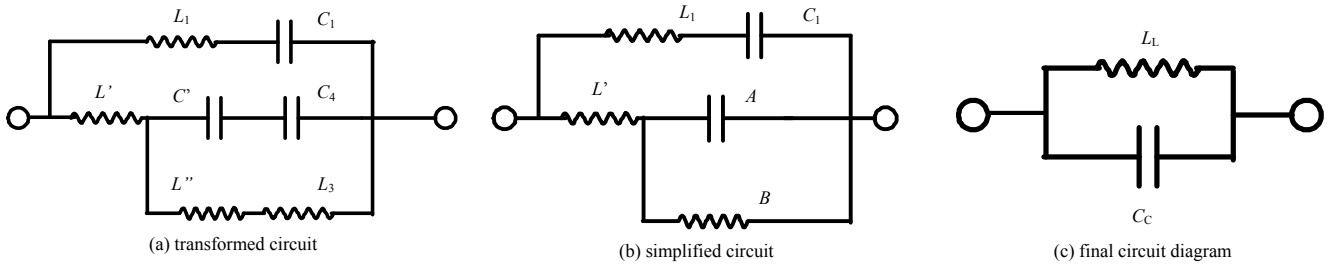


Fig.6 Simplified process of equivalent circuit
图 6 等效电路简化过程图

在电磁仿真软件中对等效电路进行验证,其仿真结果得到的传输特性与在 HFSS 三维电磁仿真软件中得到的“d”形 UC-EBG 结构对比如图 7 所示,可以看出,电路模型与“d”形结构仿真结果拟合,验证了等效电路的可靠性。

本文设计的去耦结构频率为 40 GHz,采用共面紧凑型去耦结构,降低了对工艺的要求,易于加工。

3 基于 UC-EBG 去耦结构的阵列天线仿真

3.1 基于“d”形去耦结构的一体化仿真

将设计好的“d”形去耦结构用于阵列天线中,在商业化电磁仿真软件中进行建模,模型如图 8 所示。“d”形周期结构摆放于阵元间,由于去耦结构与天线单元间的影响,原本阻抗匹配的四元线阵的四端口阻抗均发生一定程度变化,因此需要进行去耦结构和阵列天线一体化优化设计。

为验证“d”形周期结构的去耦效果,首先对集成前后的线阵的四端口 S_{12}, S_{23}, S_{34} 进行仿真对比,仿真结果如图 9 所示。仿真结果表明,天线集成“d”形去耦结构后,降低了四端口间的 S_{12}, S_{23}, S_{34} 。隔离度由原来的最好值 13.8 dB 优化至最优值 42.5 dB。

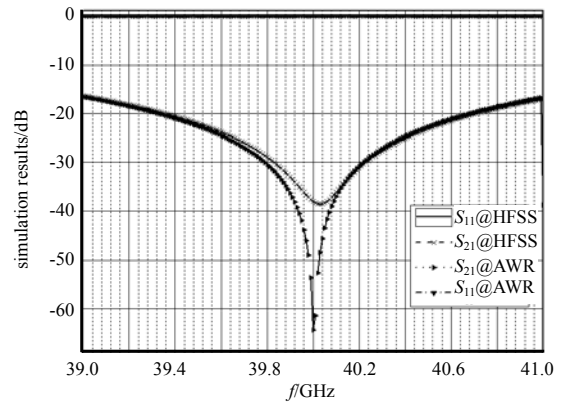


Fig.7 Equivalent circuit verification
图 7 等效电路验证

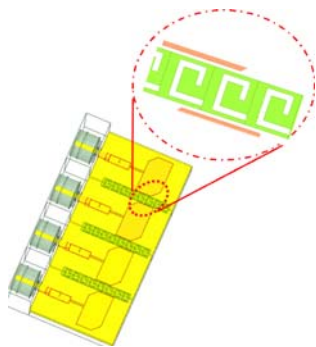


Fig.8 Glass array antenna model based on d-shape decoupling structure

图 8 基于“d”形去耦结构的玻璃阵列天线模型

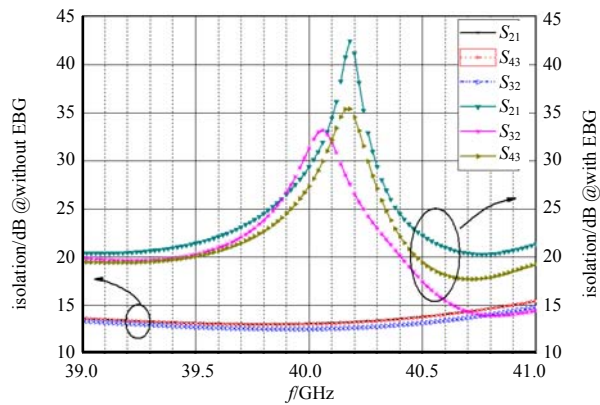


Fig.9 Comparison of isolation between array antennas before and after decoupling
图 9 阵列天线去耦前后隔离度对比

对集成前后线阵的有源驻波比进行仿真对比,仿真结果如图 10 所示。线阵进行 45°一维电扫时,有源驻波比明显恶化,未集成去耦结构的阵列天线有源驻波比最大值达到 4.26;集成“d”形结构的阵列天线有源驻波比最大值为 2.70,集成去耦结构明显改善阵列天线的有源驻波比。

3.2 结果分析

将设计的基于去耦结构的阵列天线与参考文献中的天线进行对比,如表 1 所示。文献[10]研究了不同单元边界距离下的去耦情况,随着距离的增加,去耦效果愈佳。而文献[11]中采用 5 列周期去耦结构,虽然单元尺寸较小,但用于天线单元之间总尺寸为 0.25λ 。本文设计的阵列天线单元边界距离仅为 0.11λ ,去耦结构更加简单,同时实现了小型化。

表 1 与近几年去耦文章对比

Table 1 Comparison with decoupling articles in recent years

references	scale	isolation improvement /dB	boundary distance of the smallest unit/ λ	bandwidth of -10 dB	EBG size/ λ
[5]	1×2	16.0	0.22	2.5%@5 GHz	0.14×0.14
[10]	1×2	30.1	0.50	2.3%@5.6 GHz	0.125×0.100
[11]	1×2	5.0	0.80	5.8%@4.25 GHz	0.05×0.05
proposed	1×4	31.2	0.11	1.8%@40 GHz	0.08×0.08

本文设计的基于去耦结构的阵列天线更加紧凑，工作频带上端口隔离度最大改善值都高于参考文献中的隔离度。

4 结论

本文设计了“d”形共面紧凑型电磁带隙去耦结构，对其进行设计优化及等效电路分析，并将其用于 Ka 频段的玻璃阵列天线设计中。仿真计算表明，阵列天线阵元间隔离度由 15.8 dB 提升至 42.5 dB；在进行一维 $\pm 45^\circ$ 扫描时，还可有效改善阵列天线的有源驻波比，将最高有源驻波比从 4.26 改善至 2.70。验证了该 UC-EBG 结构能明显抑制天线表面波的传播，降低阵列天线阵元的耦合效应。该玻璃基阵列天线可用于 Ka 频段的一维电扫封装天线，实现高集成、小型化的相控阵天线。

参考文献：

- [1] 孙德明. 基于单辐射体的 MIMO 天线研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (SUN Deming. Research on MIMO antennas based on single radiator[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)
- [2] 李海雄, 张改改, 丁君, 等. 一种提高微带 MIMO 天线端口隔离度的新方法[J]. 微波学报, 2017, 33(4): 6–10. (LI Haixiong, ZHANG Gaigai, DING Jun, et al. A novel method of slot-array loading to enhance port isolation of the microstrip MIMO antenna[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(4): 6–10.)
- [3] JANASWAMY R. Effect of element mutual coupling on the capacity of fixed length linear arrays[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2002(1): 157–160.
- [4] EXPOSITO-DOMINGUEZ G, FERNANDEZ-GONZALEZ J M, PADILLA P, et al. New EBG solutions for mutual coupling reduction[C]// 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Prague, Czech Republic: IEEE, 2012: 2841–2844.
- [5] YANG Xu, LIU Ying, XU Yunxue, et al. Isolation enhancement in patch antenna array with fractal UC-EBG structure and cross slot[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16): 2175–2178.
- [6] AL-HASAN M J, DENIDNI T A, SEBAK A R. Millimeter-wave compact EBG structure for mutual coupling reduction applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 823–828.
- [7] FARAHANI H S, VEYSI M, KAMYAB M, et al. Mutual coupling reduction in patch antenna arrays using a UC-EBG superstrate[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2010(9): 57–59.
- [8] ZHANG S, ZETTERBERG P, HE S. Printed MIMO antenna system of four closely-spaced elements with large bandwidth and high isolation[J]. Electronics Letters, 2010, 46(15): 1052–1053.
- [9] 王夫蔚, 梁瑞香, 龚书喜, 等. 缺陷地结构在双频 MIMO 天线中的应用[J]. 微波学报, 2013, 29(1): 25–29. (WANG Fuwei, LIANG Ruixiang, GONG Shuxi, et al. Defected ground structure applied to the dual-band MIMO antennas system[J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(1): 25–29.)
- [10] MOHAMADZADE Bahare, AFSABI Majid. Mutual coupling reduction and gain enhancement in patch array antenna using a planar compact electromagnetic bandgap structure[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(12): 1719–1725.
- [11] 闫敦豹, 付云起, 张国华, 等. EBG 结构在微带天线阵中的应用[J]. 微波学报, 2005, 21(z1): 75–78. (YAN Dunbao, FU Yunqi, ZHANG Guohua, et al. The application of EBG structure to microstrip antenna array[J]. Journal of Microwaves, 2005, 21(z1): 75–78.)
- [12] 冯威. 小型化 MIMO 天线的去耦技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018. (FENG Wei. Research on decoupling technology of miniaturized MIMO antennas[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)

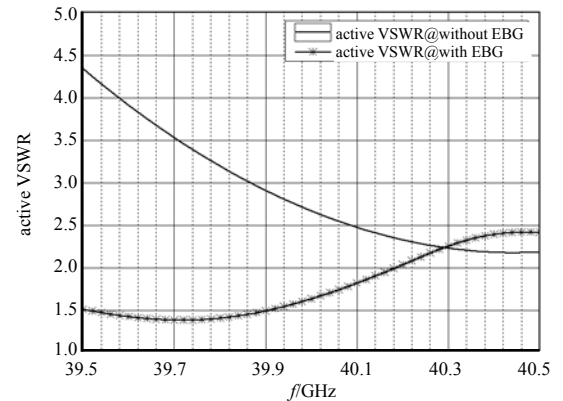


Fig. 10 Comparison of active VSWR between array antennas before and after decoupling

图 10 去耦前后有源驻波比对比