

基于可重构频率选择表面的天线 RCS 减缩研究

王夫蔚* 任宇辉 高宝建

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)

摘要: 针对天线雷达截面减缩问题, 该文提出一种基于二极管控制的可重构频率选择表面结构, 并将其用于天线的雷达截面减缩技术。论文将可重构技术应用于频率选择表面设计, 使得频率选择表面可以在带通型以及带阻型之间进行相互切换。为了在保证天线辐射特性的前提下降低天线的雷达截面, 该文考虑将可重构频率选择表面作为天线反射板用以置换一般的金属反射板。通过二极管导通/截断使得可重构频率选择表面反射板处于不同状态, 以实现天线在不同工作状态下的 RCS 减缩控制及切换。仿真及实测结果表明, 使用可重构频率选择表面反射板, 天线雷达截面的最大减缩量可达 20 dB 以上, 减缩角域可达 $-60^\circ \leq \theta \leq +60^\circ$, 同时天线的辐射特性几乎未发生变化。该方法可在保证天线辐射特性的基础上极大程度降低天线的雷达截面, 并能做到天线雷达截面减缩频段的可重构。

关键词: 天线; 雷达截面; 可重构; 频率选择表面

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)12-2983-07

DOI: 10.11999/JEIT170136

Research on Antenna Radar Cross Section Reduction Based on Reconfigurable Frequency Selective Surface

WANG Fuwei REN Yuhui GAO Baojian

(School of Information Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Active reconfigurable Frequency Selective Surface (FSS) using pin diode for the Radar Cross Section (RCS) reduction of antenna is proposed. The reconfigurable technology is applied to the FSS design. The reconfigurable FSS reflector is able to perform switch between band-pass FSS and band-stop FSS. The active reconfigurable FSS with pin diodes applies to the antenna reflector for the antenna RCS reduction, and the radiation performance of the antenna is preserved. Through the diode is on or off, the reconfigurable FSS reflectors are different states. It can contribute to the reconfigurable RCS reduction of dipole antenna under different working conditions. The simulated and measured results show the largest RCS reduction is more than 20dB, and the RCS reduction region is $-60^\circ \leq \theta \leq +60^\circ$. The radiation performance of the antenna is preserved when the diodes are ON-state. The active reconfigurable FSS provide a good method to solve the conflict between the gain enhancement and the RCS reduction. The reduction band and the state of the RCS can be switched by pin diodes.

Key words: Antenna; Radar Cross Section (RCS); Reconfigurable; Frequency Selective Surface (FSS)

1 引言

雷达截面(Radar Cross Section, RCS)减缩技术是指在战争中隐蔽自己, 最大限度避免被敌方探测雷达发现, 借以保护自身, 增强自身生存能力和战斗能力的重要技术^[1-3]。RCS 既与目标的几何参数和物理参数有关, 如: 目标的尺寸、形状、材料、结构等, 又与雷达探测波的参数有关, 如: 频率、极化等, 同时还与目标相对于探测雷达的姿态角有

关。一般来说, 飞行器和舰艇的雷达隐身性能主要取决于它们 RCS 的大小, 其隐身技术主要集中在通过各种方法减小飞行器和舰艇对雷达探测波的有效散射截面, 实现降低敌方雷达作用距离的目的。在武器平台中, 天线系统必不可少的分布在平台的各个位置, 对于低 RCS 武器平台, 天线系统的 RCS 就相对显得巨大, 其 RCS 控制问题逐渐凸显, 则天线的隐身性能也就成为影响整体平台隐身性能好坏的主要因素之一。天线的特殊性在于其首先要保证自身稳定的工作性能, 即天线的辐射性能, 其次再考虑隐身问题。从而常规的目标隐身方式^[4,5](外形设计, 吸波材料等)应用于天线隐身中时会遇到很大的困难, 因此, 天线系统的隐身技术已经成为目标平

收稿日期: 2017-02-21; 改回日期: 2017-09-05; 网络出版: 2017-11-01

*通信作者: 王夫蔚 wfwrail@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501372)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61501372)

台隐身中亟待解决的关键问题之一。

可重构技术是指通过具有动态可变的特定功能部件来实现系统在一定输出信号作用下性能动态可调。近年来,可重构技术已成功地应用于天线设计中,早期研究主要是通过改变辐射体的结构进而改变辐射体的电流分布,从而使得天线的频率、方向图或极化、阻抗等参数发生改变。Ouedraogo 等人^[6]将可重构技术用于天线波束调整,Wang 等人^[7]使用可重构技术使得天线能够在更宽的频段内工作,Piazza 等人^[8]通过可重构天线的方向图使其能够工作在 MIMO 系统中。除此之外,可重构技术还被广泛应用于电磁学领域之中^[9-11]。相比之下,可重构技术用于天线 RCS 减缩的研究较少,官等人^[12]将可重构技术用于微带天线地板中,实现了 5.8 dB 的 RCS 减缩。Huang 等人^[13]利用频率可重构技术使得天线 RCS 降低了 7 dB。目前,天线 RCS 减缩领域越来越多用到了超材料技术,如结构型吸波材料^[14]、电磁带隙结构^[15]、左手材料^[16]等都已成功用于天线 RCS 减缩。可重构超材料在天线中的应用目前处于起步阶段,Yan 等人^[17]用可重构超材料实现了天线的方向图可重构。Sim 等人^[18]将极化可重构的谐振环用于微带缝隙天线的圆极化设计中,取得了良好的圆极化效果。Yang 等人^[19]利用可重构 AMC 结构实现了偶极子天线的极化可重构。

矛盾的焦点是,天线进行 RCS 减缩时需保证其原有辐射特性,而可重构超材料技术一般都会改变原有辐射特性,也就为 RCS 减缩造成了困难。因此,国内外文献还没有关于可重构技术与超材料相结合^[20]并用于天线 RCS 减缩的研究。同时,频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)^[21-23]结构以其所具有的独特地物理特性越来越受到国内外学者的关注。若将可重构技术和 FSS 相结合,使得 FSS 的带通/带阻等特性可以随着外部控制实时发生改变,在特定频段内达到带通特性或带阻特性的即时切换。并将其应用于机载或弹载平台或天线的隐身,就能很好实现辐射与散射特性的协同考虑,并使得天线系统在复杂多变的电磁环境中具有较好的适应能力。

基于各种综合因素考虑,本文设计了一款新型的可重构 FSS 结构,使得 FSS 通过二极管控制分为两种状态,并将其作为天线反射板使用。当二极管处于截断状态,FSS 的 S_{21} 可达 -25 dB 左右,具有明显的带阻特性,而在此频段之外滤波特性呈现明显的通带特性,则天线的辐射特性得到最大程度的保留。而当二极管电阻为零即导通状态时,此时,FSS 在包含中心频率在内的较宽的频带范围内,其

S_{21} 均接近于 0 dB,具有明显的带通特性,此时电磁波可以直接透射过该 FSS,即可最大程度降低天线的 RCS。仿真和实测结果表明,在最大限度保留天线辐射特性的同时,当使用可重构频率选择表面反射板时,同时天线的 RCS 在 1-8 GHz 频率范围内得到减缩,且最大减缩量可达 20 dB 以上。本文所做工作使得天线可以随意切换自身的工作以及隐身状态,实时改变自身的低 RCS 频带特性,同时最大限度地保留了天线的辐射特性,很大程度上降低了被敌方雷达所探测到的风险与概率。

2 可重构频率选择表面结构分析及设计

目前电磁学领域一般使用电磁仿真软件完成 FSS 的设计过程。在设计之前,首先需要对可重构频率选择表面的传输系数特性也就是 S 参数进行分析,包括介质介电常数,寄生单元长度,寄生单元宽度 3 个参数。本文的所有仿真结果均使用 Ansys 公司的 HFSS 13 进行。图 1 所示为可重构频率选择表面的结构示意图,FSS 的基本参数已在图中标示(单位: mm)。需要说明的是:在所有的天线设计以及超材料设计中,讨论的均为单一参数对于电磁特性的影响,不存在一个参数对传输系数的影响时,其它参数也要相应变化的情况。因此,在分析某一个参数对传输系数的影响时,其它参数均保持不变。

(1) 介质介电常数对可重构 FSS 传输特性的影响: 为了说明介质介电常数对 FSS 特性的影响,其他参数如图 1 所示。分别选取介质介电常数 $\epsilon_r = 2.2$, $\epsilon_r = 3.0$, $\epsilon_r = 4.4$, 仿真得到其传输特性如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着介电常数的减小,二极管断开状态下的 FSS 结构阻带中心频率明显增加,带宽变化不大;二极管导通状态下的 FSS 结构,通带中心频率升高,带宽增加。同时,随着介质介电常数的减小,两种情况下 FSS 结构的中心频率基本保持在同一频点,并未发生太大的偏移。

(2) 寄生单元长度对可重构 FSS 的影响: FSS

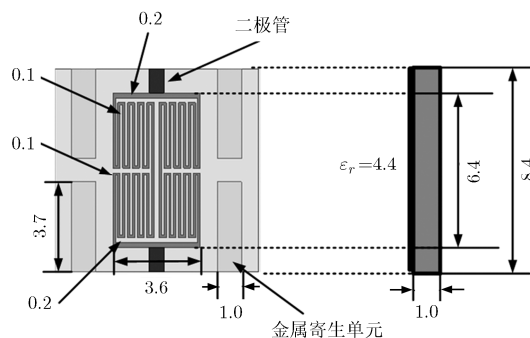


图 1 可重构频率选择表面结构示意图

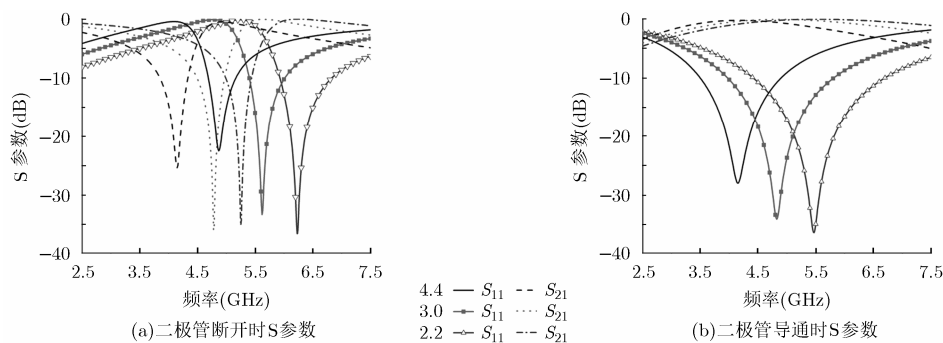


图2 介电常数对 FSS 传输特性的影响

单元的四角分别有 4 个寄生单元, 寄生单元的尺寸参数直接影响了 FSS 结构的等效电容, 即对整个 FSS 结构的传输特性会产生影响, 有必要先对寄生单元的长度对可重构 FSS 传输特性的影响进行分析。分别选取寄生单元长度为 6.0 mm, 6.8 mm, 7.3 mm, 得到其对可重构 FSS 传输特性的影响, 仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 随着寄生单元长度的增加, 二极管断开状态下的 FSS 结构阻带中心频率保持不变, 带宽略微变大, 阻带外的通带中心频率减小明显, 并且带宽下降。二极管导通状态下, 随着寄生单元长度的增加, 通带中心频率明显降低, 带宽也随之减小。

(3)寄生单元宽度对可重构 FSS 的影响: 接下来对寄生单元的宽度对可重构 FSS 传输特性的影响进行分析。分别取寄生单元宽度分别为 1.0 mm, 1.1 mm, 1.2 mm, 得到寄生单元的宽度对可重构 FSS 传输特性的影响, 仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 其变化规律与改变寄生单元长度时类似, 随着宽度的变大, 在二极管断开状态下的 FSS 结构中心频率以及带宽均未发生明显改变。二极管导通状态下, 中心频率有小幅降低。

通过参数分析后所得的与实例中天线工作频段所匹配的可重构频率选择表面结构的传输特性如图

5 所示, 其结构参数如图 1 所示。可以看出当二极管处于截断状态, 即电阻为无穷大时, 为二极管断开状态, 该 FSS 在 3.75 GHz 附近时 S_{21} 可达 -25 dB 左右, 具有明显的带阻特性, 而在此频段之外滤波特性呈现明显的通带特性。而当二极管电阻为零即二极管导通时, 此时, FSS 在 3.75 GHz 为中心频率的较宽的频带范围内, 其 S_{21} 均接近于 0 dB, 具有明显的带通特性, 此时电磁波可以直接透射过该 FSS, 而在此频段之外滤波特性呈现带阻特性。

这就表明, 在二极管断开时, FSS 表现为典型的空间带阻滤波器特性, 当入射波频率处于 FSS 的阻带频率时, 电磁波照射至 FSS 大部分沿入射路径返回, 而小部分电磁波透射, 而处于阻带频率之外的电磁波则与之相反。在二极管导通时, FSS 表现为典型的空间带通滤波器特性, 当入射波频率处于 FSS 的通带频率时, 电磁波照射至 FSS 小部分沿入射路径返回, 而大部分电磁波透射, 处于通带频率之外的电磁波则与之相反。

3 可重构频率选择表面在天线 RCS 减缩中的应用

可重构频率选择表面的实验应用方案一般采用为反射板置换以及天线罩模式。下面以反射板置换应用模式介绍其在天线 RCS 减缩中的应用技术。图

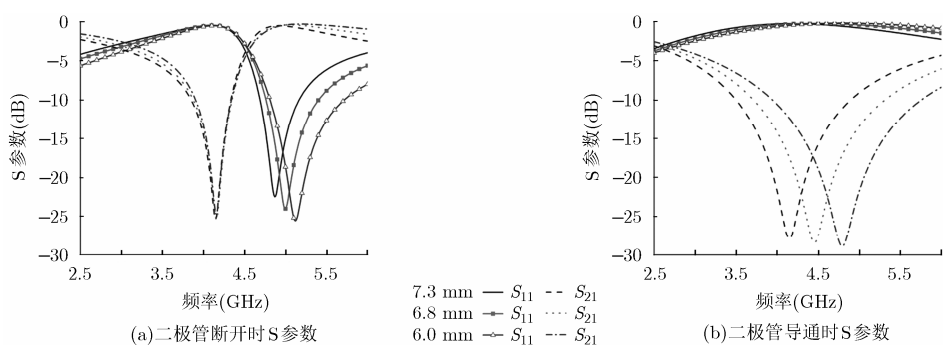


图3 寄生单元长度对 FSS 传输特性的影响

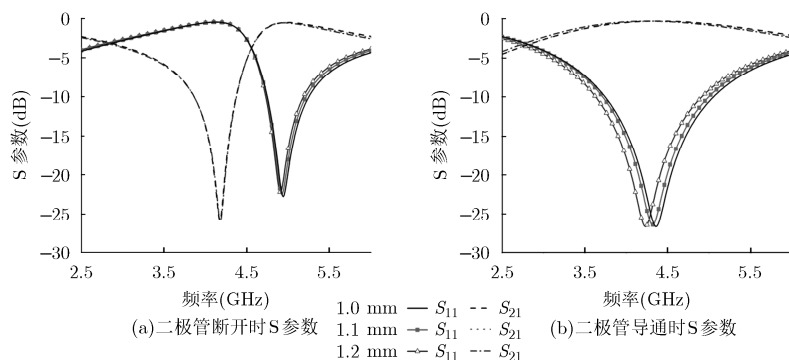


图4 寄生单元宽度对FSS传输特性的影响

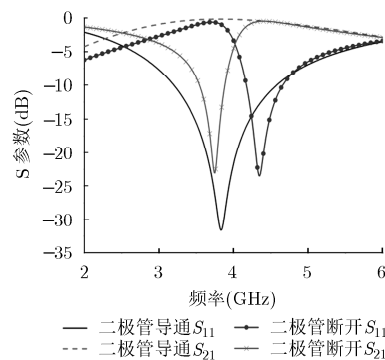


图5 可重构频率选择表面S参数示意图

6所示为可重构频率选择表面结构示意图,图7所示为可重构频率选择表面用于天线反射板的示意图,将可重构频率选择表面置换一般的金属板作为天线的反射板。当二极管处于截断状态时,可重构FSS反射板在工作频段内具有带阻特性,而在此频段之外呈现明显的通带特性,在天线的辐射特性保留的同时实现天线带外RCS减缩。而当二极管电阻为零即二极管导通时,此时,可重构FSS反射板在包含中心频率在内的较宽的频带范围内,具有明显的带通特性,此时该频段电磁波可以直接透射过该FSS,即可最大程度降低天线的带内RCS。同时,本文提出一种统一加载偏置电压的方式,使得可重构FSS的偏置电压控制大大简化。综上所述,本文考虑对应天线的不同状态,通过对二极管的控制使得频率选择表面反射板实现滤波特性动态可重构,并通过置换金属反射板降低天线系统的RCS同时实现RCS减缩频段的可重构。

为了说明该方案的有效性,针对之前给出的可重构FSS结构,通过使用可重构FSS置换金属反射板的方法,对置换前后天线的辐射散射特性进行分析。首先,当天线处于工作状态时,分别对天线使用普通金属反射板以及本文所提出的可重构频率选

择表面反射板进行了仿真及实实验证。仿真及实测S₁₁如图8所示,方向图如图9所示。可以看出当天线处于工作状态时,二极管截断,天线的S₁₁特性以及辐射方向图与金属反射板相比基本吻合。天线增益比原始天线增益减小不到0.3 dB。因此,在天线的工作频带内,处于二极管截断状态下使用可重构FSS反射板能够最大限度的保证天线的辐射性能。

其次,本文重点讨论了利用FSS滤波特性可重构进行天线的RCS减缩,为了验证RCS的减缩效果,下面论证可重构FSS反射板处于不同状态时天线的RCS变化。设置平面波沿天线结构表面,垂直于反射板入射,入射波极化为 θ 极化。在平面波照射下,天线RCS随频率的变化如图10所示。从图中可看出,当二极管处于断开状态,与金属反射板相比天线的带内RCS没有明显变化,而带外RCS有了明显的下降。当二极管处于导通状态,天线的带内RCS则发生明显的下降。与滤波特性的仿真结果完全吻合。以此可以说明由二极管控制的频率选择表面滤波特性的可重构方式以及将其应用于天线系统的RCS减缩方法是有效可行的。

为了进一步说明该方法在天线带内的RCS减缩效果,图11给出了使用可重构频率选择表面反射

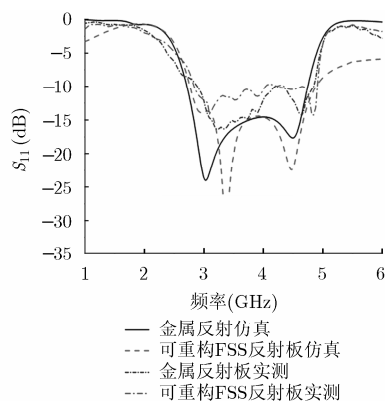
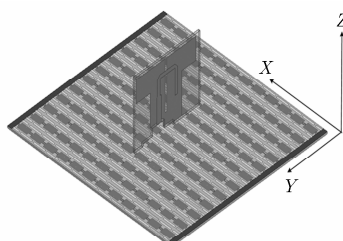
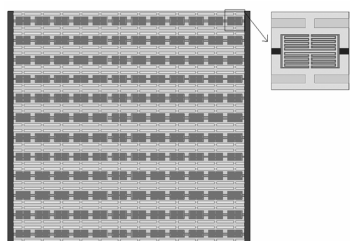


图6 可重构频率选择表面反射板结构示意图 图7 可重构频率选择表面反射板的应用示意图

图8 天线S₁₁对比曲线

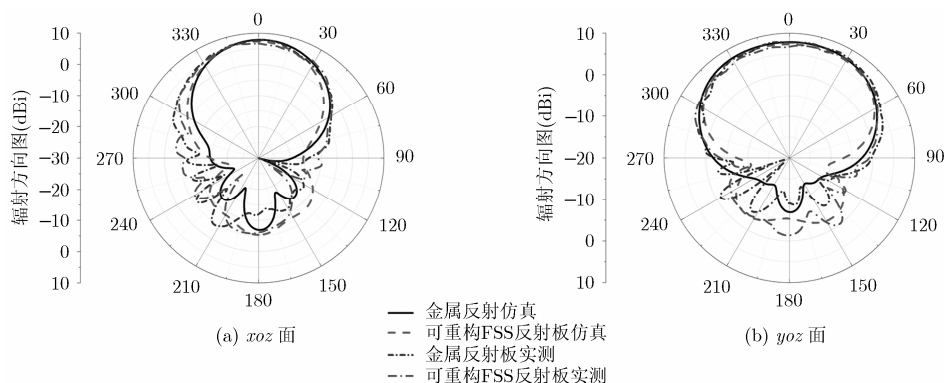


图9 天线辐射方向图仿真与实测对比曲线(3.75 GHz)

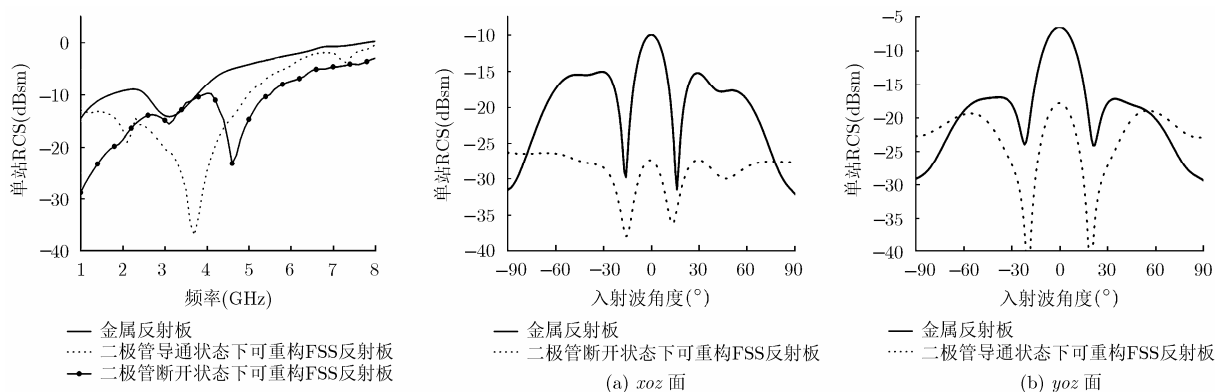


图10 单站 RCS 变化曲线

图11 天线单站 RCS 随入射波角度变化对比曲线图

板前后天线的单站 RCS 随角度的变化曲线, 中心频率设置为 3.8 GHz, 入射波极化为 θ 极化。如图 11(a) 所示, 使用可重构 FSS 反射板时, 天线 xoz 面的 RCS 减缩区间为 $-80^\circ \leq \theta \leq +80^\circ$, 最大减缩量可达 20 dB 以上。图 11(b) 给出了天线 yo z 面上 RCS 随角度的变化曲线, RCS 的减缩区间为 $-60^\circ \leq \theta \leq +60^\circ$ 最大减缩量可达 15 dB 以上。图 12 给出了使用可重构频率选择表面反射板前后天线的双站 RCS 随入射波入射角度变化曲线。入射波垂直于反射板入射, 中心频率 3.8 GHz, 极化方式同样为 θ 极化。由图可以看出, 使用可重构频率选择表面反射板替换金属

反射板后, 天线的双站 RCS 在天线上方的全角域范围内都有明显的缩减。由此可得, 当反射板处于二极管导通状态时, 天线 RCS 减缩角度范围很大, 具有很好的工程应用价值。

从天线的 RCS 曲线可以进一步论证可重构 FSS 反射板的物理现象。即当可重构 FSS 反射板处于二极管截断时, 由反射板正上方垂直入射处于天线工作频段内的电磁波基本沿原路径返回, 只有极小部分透射。处于天线工作频段外的电磁波与之相反。此时天线的带内 RCS 基本不变, 而带外 RCS 明显下降。而当可重构 FSS 反射板处于二极管导通时,

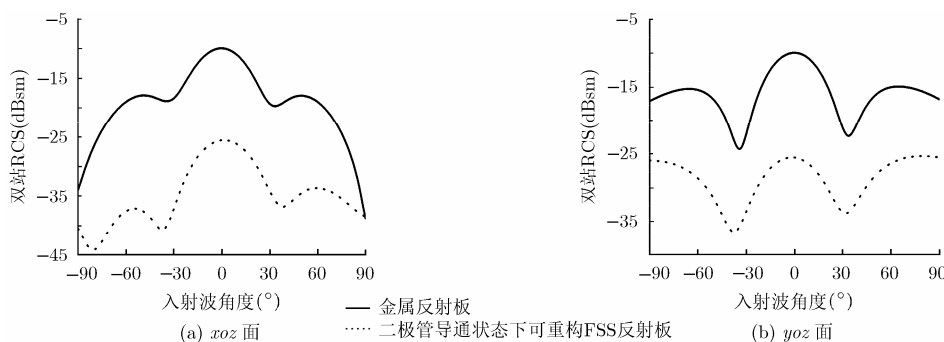


图12 天线双站 RCS 随入射波角度变化对比曲线图

由反射板正上方垂直入射处于天线工作频段内的电磁波基本透射,只有部分沿原路返回,此时天线的带内 RCS 明显下降。

4 结束语

可重构技术作为目前电磁学的研究热点,已得到广泛关注。可重构技术与超材料的结合及其在天线 RCS 减缩中的应用作为本文的研究重点,本文提出了一种新型的可重构频率选择表面结构,该结构使得频率选择表面在某一频段内可实现带通以及带阻特性的实时切换。文中给出了可重构频率选择表面的应用方法,用其置换一般的金属反射板。以此实现天线在不同状态下的隐身状态切换,并能够最大限度地保留天线辐射性能,使得隐身天线在复杂多变的电磁环境中具有较好的适应能力及灵活性,具有较强的可行性。仿真及实测结果表明,使用可重构频率选择表面反射板,天线 RCS 的最大减缩量可达 20 dB 以上,减缩角域可达 $-60^\circ \leq \theta \leq +60^\circ$ 以上,同时天线辐射特性得以保留。在此基础上,未来考虑将可重构特性进一步拓展为可控特性,使得超材料的特性发生线性改变,使天线系统进一步在复杂多变的电磁环境中具有较好的适应能力。

参考文献

- [1] 周禹龙,曹祥玉,高军,等. 双频频率选择表面及其在微带天线宽带 RCS 减缩中的应用[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1446-1451. doi: 10.11999/JEIT160854.
ZHOU Y L, CAO X Y, GAO J, et al. Dualband frequency selective surface and its application to wideband RCS reduction of the microstrip antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1446-1451. doi: 10.11999/JEIT160854.
- [2] 张晨,曹祥玉,高军,等. 低 RCS 宽带磁电偶极子贴片天线设计[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 1012-1016. doi: 10.11999/JEIT150897.
ZHANG C, CAO X Y, GAO J, et al. Low radar cross section and broadband magneto-electric dipole patch antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 1012-1016. doi: 10.11999/JEIT150897.
- [3] PAN W B, HUANG C, CHEN P, et al. A Low-RCS and high-gain partially reflecting surface antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(2): 945-949. doi: 10.1109/TAP.2013.2291008.
- [4] JIANG W, LIU Y, GONG S X, et al. Application of bionics in antenna radar cross section reduction[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 1275-1278. doi: 10.1109/LAWP.2009.2037168.
- [5] WANG F W, JIANG W, HONG T, et al. RCS reduction of wideband antenna with a novel wideband radar absorbing materials[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, 8(7): 491-497. doi: 10.1049/iet-map.2013.0356.
- [6] OUEDRAOGO R O, ROTHWELL E J, and GREETIS B J. A reconfigurable microstrip leaky-wave antenna with a broadly steerable beam[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(8): 3080-3083. doi: 10.1109/TAP.2011.2158970.
- [7] WANG B Z, XIAO S Q, and WANG J. Reconfigurable patch antenna design for wideband wireless communication systems [J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2007, 1(6): 414-419. doi: 10.1049/iet-map:20050349.
- [8] PIAZZA D, MOOKIAH P, D'AMIO M, et al. Experimental analysis of pattern and polarization reconfigurable circular patch antennas for MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2352-2362. doi: 10.1109/TVT.2010.2043275.
- [9] CAI Y X and DU Z W. A novel pattern reconfigurable antenna array for diversity systems[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 1227-1230. doi: 10.1109/LAWP.2009.2035720.
- [10] LAI M I, WU T Y, HSIEH J C, et al. Design of reconfigurable antennas based on an L-shaped slot and PIN diodes for compact wireless devices[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2009, 3(1): 47-54. doi: 10.1049/iet-map:20080049.
- [11] CHANG W J, LI M, LI G P, et al. Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antenna integrated with RF-MEMS switches[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(2): 455-463. doi: 10.1109/TAP.2005.863407.
- [12] 官正涛,何海丹,何庆强. 一种基于可重构机理的微带天线 RCS 减缩技术[J]. 成都大学学报, 2014, 33(4): 362-364.
GUAN Z T, HE H D, and HE Q Q. Reconfigurable microstrip antenna RCS reduction technique[J]. *Journal of Chengdu University*, 2014, 33(4): 362-364.
- [13] HUANG C, PAN W B, MA X L, et al. Low-loss circularly polarized transmitarray for beam steering application[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(10): 4471-4476. doi: 10.1109/TAP.2016.2586580.
- [14] 王夫蔚,龚书喜,张鹏飞,等. 结构型吸波材料在阵列天线 RCS 减缩中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(5): 116-120. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2012.05.016.
WANG F W, ZHANG P F, GONG S X, et al. Radar absorbing material applied to the RCS reduction of array antennas[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(5): 116-120. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2012.05.016.
- [15] LI Y Q, ZHANG H, FU Y Q, et al. RCS reduction of ridged waveguide slot antenna array using EBG radar absorbing material[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*,

- 2008, 7: 473–476. doi: 10.1109/LAWP.2008.2001548.
- [16] WANG F W, GUO L X, and GONG S X. Left-handed material superstrate applied to the RCS reduction of microstrip antenna[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2016, 30(11): 1428–1439. doi: 10.1080/09205071.2016.1202784.
- [17] YAN S and VANDENBOSCH G A E. Radiation pattern-reconfigurable wearable antenna based on metamaterial structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1715–1718. doi: 10.1109/LAWP.2016.2528299.
- [18] SIM C Y D, LIAO Y J, and LIN H L. Polarization reconfigurable eccentric annular ring slot antenna design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(9): 4152–4155. doi: 10.1109/TAP.2015.2443173.
- [19] YANG W H, CHE W Q, JIN H Y, *et al.* A polarization-reconfigurable dipole antenna using polarization rotation AMC structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5305–5315. doi: 10.1109/TAP.2015.2490250.
- [20] MIAS C. Varactor-tunable frequency selective surface with resistive lumped element biasing grids[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005, 5(9): 570–572. doi: 10.1109/LMWC.2005.855372.
- [21] MUNK B A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design[M]. New York, Wiley, 2000, Section II.
- [22] WANG W T, GONG, S X, WANG X, *et al.* RCS reduction of array antenna by using bandstop FSS reflector[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, 23(11): 1505–1514. doi: 10.1163/156939309789476473.
- [23] HOSSEINI A, CAPOLINO F, and FLAVIIS F D. Gain enhancement of a v-band antenna using a fabry-pérot cavity with a self-sustained all-metal cap with FSS[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(3): 909–921. doi: 10.1109/TAP.2014.2386358.
- 王夫蔚：男，1987年生，讲师，研究方向为天线设计、电磁散射、天线 RCS 减缩、超材料等。
- 任宇辉：男，1980年生，讲师，研究方向为天线设计、超材料、阵列天线等。
- 高宝建：男，1963年生，副教授，研究方向为现代通信理论等。