

文章编号: 1671-0576(2020)03-0035-06

X 波段加载部分反射表面的宽带谐振腔天线

刘 影, 苏 坪, 郭培培, 李明亮, 刘永杰

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对传统谐振腔天线的带宽窄的问题, 提出了一种新型的 X 波段加载紧凑型部分反射表面的宽带谐振腔天线。其部分反射表面为双面覆有周期阵列结构的介质基板, 具有紧凑的结构, 能够提供相对更高的增益性能, 并且在较宽的频段内具有正反射系数相位梯度。馈源天线是一个宽带的孔径耦合贴片天线, 由方形贴片天线、矩形开槽的接地平面以及 Y 形馈电网络组成。仿真结果表明, 该谐振腔天线能够在 X 波段实现相对带宽 22.3%、增益 (12.78~14.00) dBi 等指标。

关键词: 宽带; 高增益; 谐振腔天线; 部分反射表面

中图分类号: TN82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2020.03.006

Wideband Resonant Cavity Antenna with Partially Reflective Surface for X-band

LIU Ying, SU Ping, GUO Pei-pei, LI Ming-liang, LIU Yong-jie

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the narrowband problem of traditional resonant cavity antenna (RCA), a novel wideband resonant cavity antenna with compact partially reflective surface (PRS) for X-band is presented. PRS is a dielectric slab with double-deck periodic array structure, which can provide relatively higher gain performance with compact structure. In addition, the reflection coefficient phase gradient of PRS is positive in wider band. The feed antenna is a wideband aperture-coupled patch antenna, which is composed of square patch antenna, ground plane with rectangular slot and Y-shaped feed network. The simulation results show that the relative bandwidth of RCA is 22.3% and the gain is between 12.78 dBi and 14.00 dBi in X-band.

Key words: wideband; high gain; resonant cavity antenna; partially reflective surface

0 引言

随着无线通信技术的迅速发展,对于宽带高增益天线的需求越来越迫切,尤其是在频率较高的微波、毫米波段^[1]。传统的天线高增益性能可以通过加载反射器^[2]、波导喇叭^[3]以及微带天线阵列^[4]等方式实现,但存在成本高、设计复杂等问题。谐振腔天线(Resonant Cavity Antenna, RCA)^[5]作为一种定向天线,因其结构及馈电机理简单、成本低等诸多优势,引起了学者的广泛关注。

在最近几十年里,电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构在抑制电磁波传播方面的应用引起了学者的广泛关注,其中一个重要的应用是高增益的法布里-珀罗谐振腔天线,也就是EBG谐振腔天线^[6]。传统的EBG谐振腔天线,用EBG结构作为部分反射表面(Partially Reflective Surface, PRS)。PRS放置于距接地平面一定距离的上方,与接地平面之间形成空气腔,通过单个天线或天线阵列馈电,天线的主要性能由PRS的电磁属性决定。这种EBG谐振腔天线是一种典型的窄带谐振腔天线^[7]。提高谐振腔天线增益带宽的方法一般有三种:一是采用阵列天线替代单个天线进行馈电^[8],然而复杂的馈电网络给天线设计带来了难度;二是通过使用高阻抗表面和单层的频率选择表面分别作为接地平面和部分反射表面,来提高谐振腔天线的带宽^[9];三是使用具有正反射系数相位梯度的部分反射表面作为覆盖层,在宽频带内实现较高的增益^[10]。上述三种方法中,最后一种方法对宽带谐振腔天线的实现最为有效,并且最简单、最容易实现,同时天线剖面高度也是最小的。

针对传统EBG谐振腔天线的窄带缺点,基于上述第三种方法,设计了一种新型的宽带谐振腔天线。相比文献^[10]中所提出的PRS,本文所设计的PRS具有更加紧凑的结构特征,并能够提供相对更高的增益性能。通过紧凑型PRS与宽带孔径耦合贴片天线(馈源天线)的结合,能够有效提高宽带谐振腔天线的增益。

1 谐振腔天线理论

谐振腔天线由馈源天线、接地平面和放置在

接地平面上方的部分反射表面组成。部分反射表面与接地平面之间形成一个谐振腔,从馈电单元辐射的电磁波在谐振腔中不断传输和反射,当满足一定的谐振条件时,透射出介质层的电磁波可以实现同向叠加,因此提高了天线的增益。

谐振腔天线的工作频率、方向性、增益带宽等特性主要由PRS的电磁属性决定。其中工作频率计算公式为^[10]

$$f = \frac{c}{4\pi h}(\varphi_H + \varphi_L - 2N\pi), N = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: c 为光速; h 为谐振腔高度,即PRS与接地平面之间的距离; φ_H 和 φ_L 分别为PRS和接地平面的反射系数相位。

当接地平面为理想电导体(Perfect Electric Conductor, PEC)时, $\varphi_L = \pi$,式(1)可改写为

$$\varphi_H = \frac{4\pi h}{c}f + (2N - 1)\pi, N = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

由式(2)可知,当 f 与 φ_H 成正比时,可以保证谐振腔高度 h 保持不变。PRS能够在宽频带内频率 f 与反射系数相位 φ_H 成正比。利用这一特点,RCA可以在一个较宽的频率范围内满足谐振条件^[11]。

谐振腔天线的方向性系数 D 由馈源天线和PRS的方向性系数决定,计算公式为

$$D = D_{\text{Feed}} + D_{\text{PRS}} \quad (3)$$

其中

$$D_{\text{PRS}} = 10 \log \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (4)$$

式中: D_{Feed} 为馈源天线的方向性系数; D_{PRS} 为PRS的方向性系数; ρ 为PRS的反射系数幅度。由式(4)可知,PRS的反射系数幅度 ρ 越大, D_{PRS} 越大,则 D 就越大。

RCA的口径尺寸估算公式为^[12]

$$A = 10^{D/10} \lambda^2 / \pi^2 \quad (5)$$

式中: λ 为RCA的工作波长。

2 宽带谐振腔天线设计

2.1 部分反射表面设计

对于谐振腔天线而言,PRS的设计至关重要。本文所设计的PRS具有互补紧凑的结构特

征,并且具有正反射系数相位梯度,能够在宽频段内给馈源天线提供较高的增益。

选用 Rogers RT/duriod 5880 作为 PRS 的介质基板,PRS 由双面敷铜周期阵列结构的介质基板组成,介质板厚度 $d=0.781\text{ mm}$,如图 1 所示。PRS 上表面由方形环状金属内嵌方形金属贴片结构组成;下表面由方形环状金属和去方形孔状金属贴片结构组成。

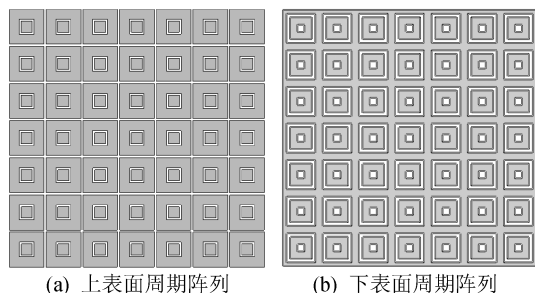


图 1 PRS 阵列结构示意图

PRS 的单元结构如图 2 所示。其中, $l_1=2\text{ mm}$, $l_2=4.7\text{ mm}$, $l_3=1.5\text{ mm}$, $l_4=3\text{ mm}$, $l_5=4\text{ mm}$, $l_6=1\text{ mm}$, $P=5\text{ mm}$ 。

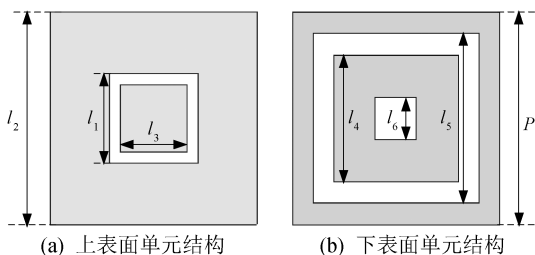


图 2 PRS 单元结构示意图

利用 HFSS 电磁仿真软件,结合主从边界条件,对单元进行仿真,得到的 PRS 的反射系数相位与幅度随频率变化曲线如图 3 所示。在 (9~11) GHz 频段范围内,PRS 的反射系数具有正梯度相位,并且反射系数幅度大于 0.59。设计的 PRS 能够在 (9~11) GHz 频段范围内提供较高的增益。

2.2 馈源天线设计

对于一个高增益的宽带谐振腔天线而言,馈源天线的设计至关重要,必须具有较宽的工作带宽和较高的增益。为了满足宽带谐振腔天线的基本要求,采用宽带口径耦合贴片天线作为馈源天线,如图 4 所示。其具体结构参数: $l_0=65\text{ mm}$,

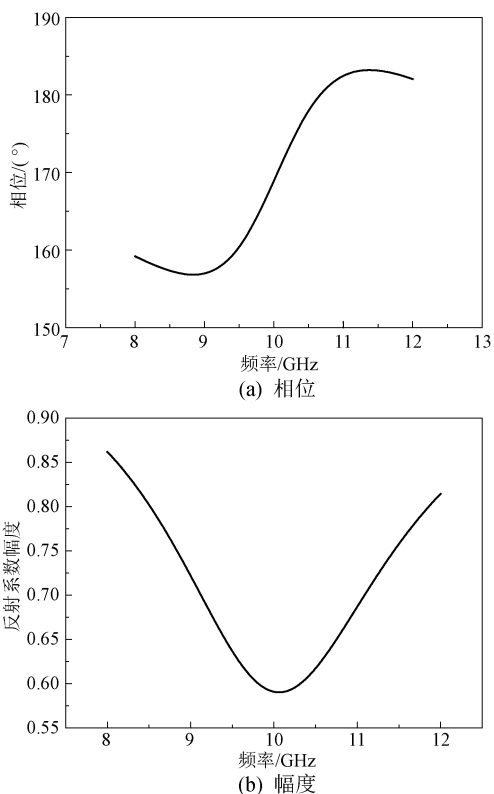


图 3 PRS 反射系数仿真结果

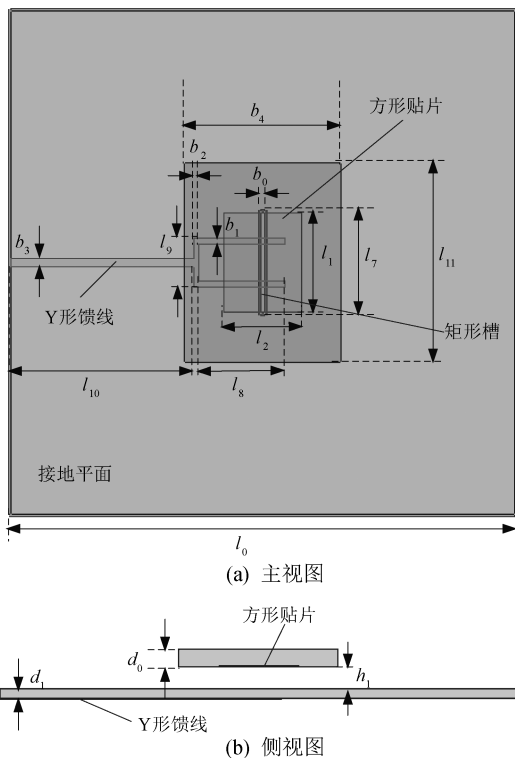


图 4 馈源天线

$l_1=12.8\text{ mm}$, $l_2=10\text{ mm}$, $h_1=2.7\text{ mm}$,

$d_0=0.781\text{ mm}, d_1=0.381\text{ mm}, b_0=0.7\text{ mm},$
 $l_7=13.5, b_1=0.7\text{ mm}, l_8=12.1\text{ mm},$
 $b_2=0.6\text{ mm}, l_9=2.4\text{ mm}, b_3=1.12\text{ mm},$
 $l_{10}=23.6\text{ mm}, b_4=20\text{ mm}, l_{11}=25.6\text{ mm}.$

该馈源天线通过接地平面上的矩形槽,对上方的金属贴片进行耦合馈电,馈电网络采用 Y 形金属馈线,有利于阻抗匹配的调节,能够使天线在较宽的频段内获得较好的阻抗匹配。

设计的馈源天线反射系数 S_{11} 仿真结果如图 5 所示。 $S_{11} \leq -10\text{ dB}$ 的匹配带宽为 (9.16 ~ 11.22) GHz,相对带宽 20.2%。

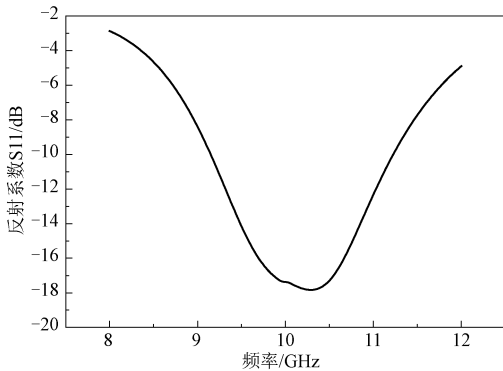


图 5 馈源天线反射系数

馈源天线的辐射方向图仿真结果如图 6 所

示。其中 φ, θ 分别表示天线辐射电场矢量在方位面和俯仰面的角度。馈源天线在 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0 GHz 频段的功率最大增益分别为 8.49, 8.85, 8.87, 8.76, 8.33 dBi。可以看出,该馈源天线在较宽的工作频段内具有较高的增益。

2.3 谐振腔天线设计

宽带 RCA 由 PRS 与馈源天线组成,如图 7 所示。PRS 和馈源天线的结构尺寸见图 2 和图 4。

由式(1)可以估算 h ,其取值在半波长左右。调节 h 可以改变天线的阻抗匹配带宽。宽带 RCA 的口径尺寸,可以利用式(2)~式(5)进行估算。最终优化结果, h 选用 15.5 mm,PRS 选用 13×13 单元元胞结构。

宽带 RCA 反射系数仿真结果如图 8 所示。可知该 RCA 能够在 X 波段实现 $S_{11} \leq -10\text{ dB}$ 、匹配带宽 (8.92 ~ 11.16) GHz、相对带宽 22.3% 的性能指标。

宽带 RCA 辐射方向图仿真结果如图 9 所示。RCA 在 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0 GHz 频段的最大增益分别为 12.78, 13.33, 13.53, 14.00, 13.89 dBi。与图 6 对比,可以看出,以 PRS 作为覆盖层,馈源天线的增益得到显著提高。

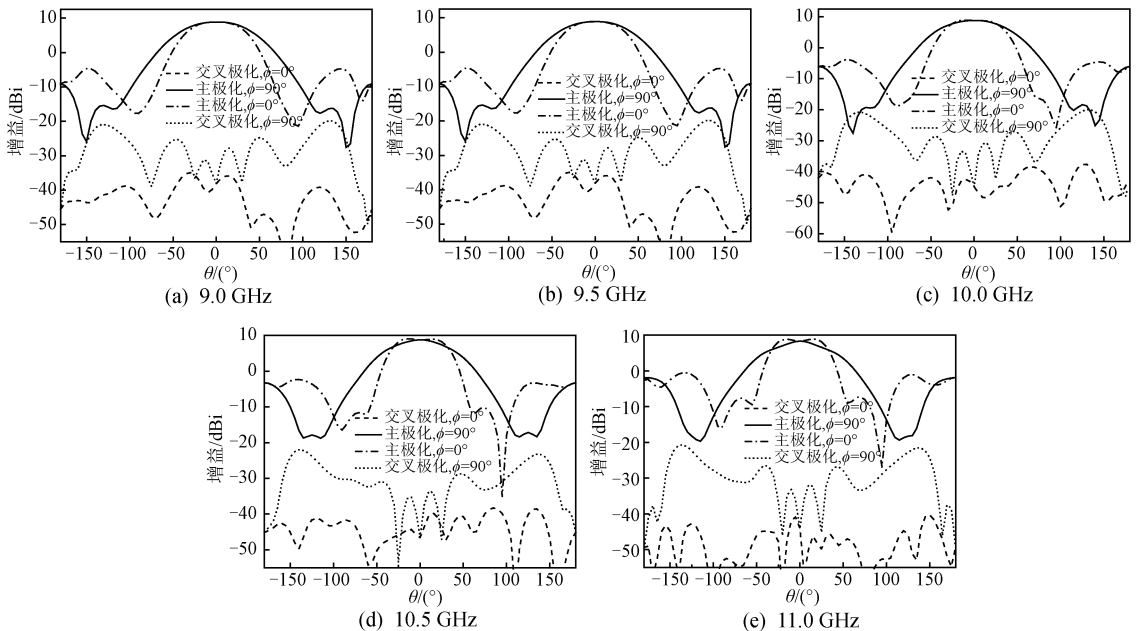


图 6 馈源天线辐射方向图

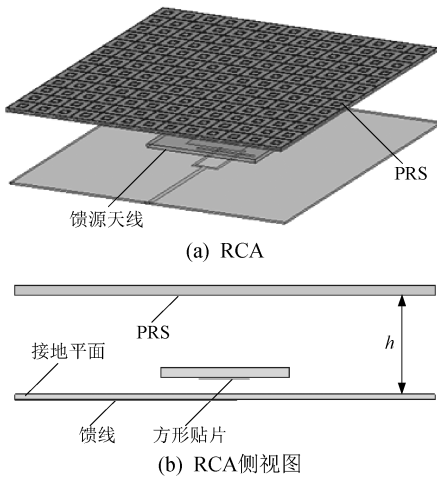


图 7 宽带 RCA 结构

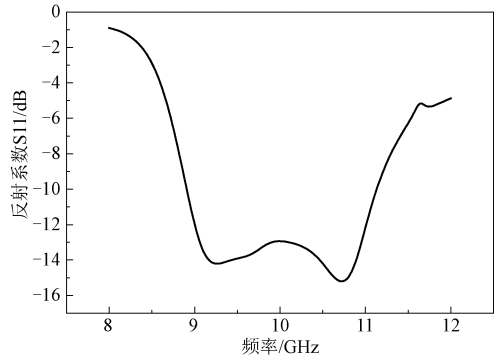


图 8 宽带 RCA 反射系数

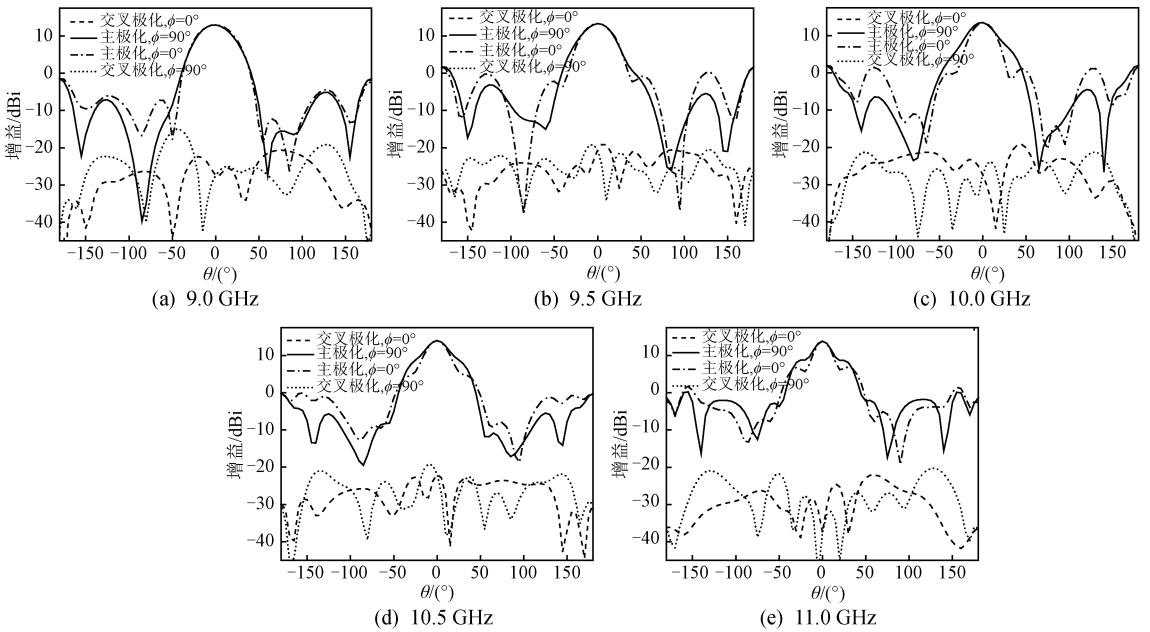


图 9 宽带 RCA 辐射方向图

3 结论

本文提出了一种新型宽带 RCA,由具有正反射系数相位梯度的 PRS 和宽带口径耦合贴片天线(馈源天线)组成。其 PRS 具有紧凑的互补结构,能够在宽频带内提供较高的增益。仿真结果表明,该谐振腔天线能够在 X 波段实现 22.3% 的相对带宽,及 (12.78 ~ 14.00) dBi 增益的性能指标。

参考文献

[1] MENG F J, LIU Y, SHARMA S K. A dual-polarized broadband resonant cavity antenna[C]// 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Hangzhou. [S.l.]: ISAPE, 2018: 1-2.

[2] MAHAJAN M, JYOTI R, SOOD K, et al. A method of generating simultaneous contoured and pencil beams from single shaped reflector antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(10): 5297-5301.

- [3] DEGUCHI H, TSUJI M, SHIGESAWA H. Compact low-cross-polarization horn antennas with serpentine-shaped taper[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(10): 2510-2516.
- [4] 李恒城, 敬守钊. 24 GHz 微带贴片天线阵的仿真与设计[J]. 微波学报, 2010(S2): 211-214.
- [5] 赵钢. 微带反射阵及低剖面谐振腔天线研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [6] MENG F J, SHARMA S K. A dual-band high-gain resonant cavity antenna with a single layer superstrate [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(5): 2320-2325.
- [7] GE Y, ESSELLE K P, BIRD T S. The use of simple thin partially reflective surfaces with positive reflection phase gradients to design wideband, low-profile EBG resonator antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 743-750.
- [8] WEILY A R, ESSELLE K P, BIRD T S, et al. Dual resonator 1-D EBG antenna with slot array feed for improved radiation bandwidth [J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2007, 1(1): 198-203.
- [9] WU Z H, ZHANG W X. Broadband printed compound air-fed array antennas [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 187-190.
- [10] WANG N Z, LIU Q, WU C Y, et al. Wideband Fabry-Perot resonator antenna with two complementary FSS layers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(5): 2463-2471.

~~~~~  
(上接第 29 页)

## 参考文献

- [1] 王小念, 苏福, 余巍, 等. 复杂电磁环境下的雷达对抗问题[J]. 现代雷达, 2008, 30(4): 21-25.
- [2] 杨娟, 池建军, 王伟中. 复杂电磁环境下雷达作战能力仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 1-4.
- [3] 伊志勇, 王鸿. 复杂电磁环境下雷达有源干扰机的设计与实现[J]. 应用科技, 2017, 44(2): 84-88.
- [4] 张鹏程, 王杰贵. 基于 DRFM 的间歇采样预测转发干扰分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 795-801.
- [5] 刘明均. 基于单通道 DRFM 的基带干扰源设计[J]. 电子科技, 2013, 26(3): 20-22.
- [6] 刘忠, 王雪松, 刘建成, 等. 基于数字射频存储器的间歇采样重复转发干扰[J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 405-410.
- [7] 陈平. 数字射频存储与处理系统的设计实现与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [8] BANDIERA F, FARINA A, ORLANDO D, et al. Detection algorithms to discriminate between radar targets and ECM signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(12): 5984-5993.
- [9] LI S Z, WANG G H, WU W, et al. Detection and tracking technique for radar network in the presence of distributed jamming [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(4): 782-788.
- [10] 谢玲, 职晓, 董洪亮. 一种基于间歇采样的重复转发干扰的建模及其仿真分析[J]. 火控雷达技术, 2014, 43(2): 19-22.
- [11] 杨春. 宽带 DRFM 雷达干扰机信号处理模块设计[J]. 电讯技术, 2012, 52(6): 918-921.
- [12] 韩文彬, 李晓燕, 郭金良, 等. 间歇采样转发干扰压制效果分析[J]. 电子信息对抗技术, 2014, 29(2): 47-50, 69.