

文章编号:2095-6134(2016)04-0542-06

基于波束扫描的 DBF 天线方向图测试方法^{*}

周建卫^{1,2†}, 李道京¹, 胡 烜^{1,2}
(1 中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室, 北京 100190; 2 中国科学院大学, 北京 100049)
(2015 年 12 月 1 日收稿; 2016 年 3 月 18 日收修改稿)

Zhou J W, Li D J, Hu X. DBF antenna pattern measurement based on beam scanning[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(4): 542-547.

摘 要 DBF 天线安装后, 一般不具备可机械旋转的常规测试条件. 研究 DBF 天线方向图的间接测试问题, 提出一种基于波束扫描的测试方法, 给出其测试原理和测试流程. 针对波束宽度、副瓣水平和波束指向等天线主要参数, 用仿真比对该方法与常规方法的测试结果和误差. 在 DBF 天线方向图正常和异常两种情况下, 两种方法可得到相近的仿真测试结果, 证明间接测试方法的有效性.

关键词 DBF 天线; 天线测试; 波束扫描; 天线方向图; 误差分析

中图分类号: TN820 **文献标志码:** A **doi:**10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2016. 04. 016

DBF antenna pattern measurement based on beam scanning

ZHOU Jianwei^{1,2}, LI Daojing¹, HU Xuan^{1,2}
(1 National Key Lab of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The problem of inspection and measurement of DBF antenna performance is studied. Mechanical scanning is hard to be implemented after DBF antenna has been installed on vehicle. The beam of DBF antenna can be scanned electronically towards different azimuth angles, based on which a new measurement method of obtaining DBF antenna pattern indirectly is proposed. The relative measurement errors in beam width, sidelobe level, and beam directivity are analyzed afterwards. Simulations are carried out both in normal condition and abnormal condition. The results are the same as those measured by conventional spinning measurement method. The relative measurement errors in beam width, sidelobe level, and beam directivity are small. The simulation results show the effectiveness of this method.

Key words DBF antenna; antenna measurement; beam scanning; antenna pattern; error analysis

DBF 天线是天线和数字信号处理技术结合的产物, 它的天线阵列由独立的天线单元组成, 采用数字技术调整阵列中各天线的幅度和相位, 在空间形成期望的天线方向图. 其作为一种接收和

^{*} 中国科学院电子学研究所创新项目(0120227)资助
[†] 通信作者, E-mail: WLXF000@163.com

发射都采用数字波束形成技术的全数字阵列天线,以其低功耗、波束加权灵活设定、可同时多波束以及波束指向灵活控制等优点在各个领域得到了广泛的研究和应用。

天线方向图是天线的重要指标^[1]。天线方向图中包含天线的很多信息,从中可获得以下参数^[2]如波束宽度、副瓣水平、波束指向等。一般将波束曲线下降 3 dB 处定义为有效的波束宽度,又称 3 dB 主瓣宽度。这里的副瓣水平定义为第一副瓣水平。DBF 天线通常用相邻波束比幅处理对目标实现测角,本文定义其差波束零点为波束指向。实际工作中需对上述参数进行测试^[3],本文主要考虑远场条件。

天线远场的常规测试方法主要是将待测天线安装在接收转台上,通过精确改变天线在空间的机械指向,并调整天线与转轴的相对位置,使其相位中心尽可能接近测试转台的旋转轴。文献[4-5]描述远场测试天线方向图的方法,通过机械移动天线来获取其天线方向图。

DBF 天线安装后,一般不具备可机械旋转的常规测试条件,因而天线远场的常规测试方法不再适用。本文研究其天线方向图间接测试问题,提出一种基于波束扫描的 DBF 天线方向图测试方法,并给出其测试原理和测试流程。为了将其与常规测试方法区别,我们称常规测试方法为常规旋转法,本文提出的方法为波束扫描法,定义由常规旋转法得到的 DBF 天线方向图为波束旋转方向图,由波束扫描法得到的 DBF 天线方向图为波束扫描方向图。通过波束扫描法获取 DBF 天线方向图以检查 DBF 天线的主要参数如波束宽度、副瓣电平以及波束指向。

1 波束扫描法的测试原理

DBF 天线可进行多波束形成^[6-8],具有较强的方向性和较高的增益,并能实现波束电子扫描。

1.1 DBF 多波束形成

通过线阵列常规窄带波束形成^[9-10],可在不同方位角上形成相应的 DBF 天线方向图,其表达式为

$$p(\Omega) = \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\Omega), \Omega \in \Theta, \quad (1)$$

其中, \mathbf{w}^H 是加权向量,它主要用于控制波束的形成,上标“H”表示共轭转置; $\mathbf{a}(\Omega)$ 是方向响应向量,其与方位角 Ω 和阵元位置有关; Θ 是方位角

范围。

式(1)是单波束 DBF 天线方向图的表达式。下面介绍多波束情况。

根据阵列信号处理模型^[9-10],不同的加权向量对应不同的天线方向图,因而可通过改变加权向量来改变 DBF 天线方向图的波束中心指向。由 5 组不同的加权向量即可形成 5 个不同波束中心位置的 DBF 天线方向图,也就实现了同时 5 波束的数字波束形成。

设 $\Omega_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 分别为 5 个波束在空间中的波束中心位置,其天线方向图表达式为 $p_i(\Omega)$ 。根据天线原理,如果当波束指向天线孔径法线方向时,相应的天线增益为 G_0 ,则当波束中心为 Ω_i 时,平面阵列增益减少为投影到孔径的增益 $G_0 \times \cos\Omega_i$,因此需要在不同波束中心位置处对天线方向图加入权值 $\cos\Omega_i$ 。

$$p_i(\Omega) = \mathbf{w}(\Omega_i)^H \mathbf{a}(\Omega) \cos\Omega_i, i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (2)$$

1.2 基于波束扫描的测试原理

设 DBF 天线波束指向角为 Ω_0 ,假设信号源发射信号为 $s(t)$ 。

对于常规旋转测试方法,当 DBF 天线机械转到 Ω_{spin} 时,DFB 天线接收信号为

$$x(t, \Omega_{\text{spin}}) = s(t) \otimes p(\Omega_{\text{spin}}), \Omega_{\text{spin}} \in \Theta, \quad (3)$$

这里 Θ 为旋转角范围, \otimes 表示时域卷积。

将信号源发射信号归一化并将旋转角 Ω_{spin} 看作方位角变量 Ω ,得

$$x(\Omega) = \mathbf{w}(\Omega_0)^H \mathbf{a}(\Omega) \cos\Omega_0, \Omega \in \Theta. \quad (4)$$

为了降低 DBF 天线方向图的副瓣,通常对其幅度进行加权。设加权值为 w_m ,则加权向量 \mathbf{w} 变为

$$\mathbf{w}(\Omega_0) = w_m \mathbf{a}(\Omega_0). \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)中整理得

$$x(\Omega) = \mathbf{a}(\Omega)^H \mathbf{a}(\Omega_0) w_m \cos\Omega_0, \Omega \in \Theta, \quad (6)$$

式(6)即为通过常规旋转测试得到的波束旋转方向图的表达式。

下面以单波束为例,推导基于波束扫描的 DBF 天线方向图表达式。

当扫描角为 Ω_{scan} 时,DBF 天线接收信号为

$$x(t, \Omega_{\text{scan}}) = s(t) \otimes p(\Omega_{\text{scan}}), \Omega_{\text{scan}} \in \Phi, \quad (7)$$

这里 Φ 为扫描角范围。

将信号源发射信号归一化,将式(2)、式(5)代入式(7)中整理得

$$x(\Omega_{\text{scan}}) = \boldsymbol{a}(\Omega_{\text{scan}})^{\text{H}} \boldsymbol{a}(\Omega_0) w_m \cos \Omega_{\text{scan}}, \Omega_{\text{scan}} \in \Phi.$$

(8)

将扫描角 Ω_{scan} 看作方位角变量,则

$$x'(\Omega) = \boldsymbol{a}(\Omega)^{\text{H}} \boldsymbol{a}(\Omega_0) w_m \cos \Omega, \Omega \in \Phi,$$

(9)

式(9)即为通过波束扫描测试得到的波束扫描方向图.

对比式(6)和式(9)发现,

$$x'(\Omega) = x(\Omega) \frac{\cos \Omega}{\cos \Omega_0}, \Omega \in (\Phi \cap \Theta).$$

(10)

从式(10)可以看出,与常规旋转法相比,由波束扫描法测试得到的 DBF 天线方向图只多了一个加权系数 $\frac{\cos \Omega}{\cos \Omega_0}$.

当 Ω 接近指向角 Ω_0 时,即在波束主瓣附近,二者的方向图接近.当 Ω 在 $\Omega_0 - 60^\circ \sim \Omega_0 + 60^\circ$ 范围内时,二者的误差也在有限的范围之内.因而可利用波束扫描法近似得到 DBF 天线方向图.

1.3 波束扫描法的测试流程

下面结合车载 DBF 天线方位方向图测试,介绍波束扫描法的测试流程:

- 1)根据远场测试条件架设信号源,并使 DBF 天线俯仰向对准信号源,如图 1 所示.根据需要可在待测 DBF 天线周围布设吸波材料;
- 2)假定天线波束方位指向角为 0° ,在方位向移动信号源支架,使待测 DBF 天线阵面法向基准轴对准信号源辐射天线;
- 3)设定信号源频率并辐射信号,根据 DBF 天线接收数据调整信号源功率到合适位置,通常要

- 保证信噪比优于 20 dB;
- 4)使 DBF 天线以 1° 的间隔在方位向 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 实施波束扫描,记录每个扫描角对应的 DBF 天线接收数据,经插值获得波束指向角 0° 下的波束扫描方向图;
- 5)根据需要设置 DBF 天线波束方位指向角为 Ω_0 ,在方位向移动信号源支架,使信号源辐射天线偏离待测 DBF 天线阵面法向基准轴 Ω_0 .重复 3)、4)过程,获得波束指向角 Ω_0 下的波束扫描方向图.

2 波束扫描法的测试仿真

2.1 天线参数

本文选用信号频率 $f = 500 \text{ MHz}$,对应波长 $\lambda = 0.6 \text{ m}$;阵元单位按线阵排列,阵元数 $M = 16$ 个,阵元间隔 $d = 0.3 \text{ m}$;由 DBF 同时形成波束数 $N = 5$ 个,波束中心间隔 $\Delta\Omega = 5^\circ$.这里所选阵元间隔等于半波长间隔,即 $d = \lambda/2$,满足避免栅瓣产生的条件: $d \leq \lambda/2$.根据远场测量条件^[11] $R \geq 2D^2/\lambda$ 求得远场测量最小距离.参数汇总如表 1.

表 1 DBF 天线仿真参数

Table 1 Simulation parameters of DBF antenna

仿真参数	数值
信号频率/MHz	500
阵元单元/个	16
阵元间隔/m	0.3
同时波束数/个	5
波束宽度/ $^\circ$	5
远场测量最小距离/m	76.8

2.2 DBF 多波束天线方向图

由式(2)仿真得到不同波束指向角下的 DBF 多波束天线方向图,如图 2 所示. DBF 天线可同时形成 5 波束,波束排列方式如图中所示,自左向右依次为波束 1(·····)、波束 2(- · - · -)、波束 3(- - -)、波束 4(—)、波束 5(°).我们把波束

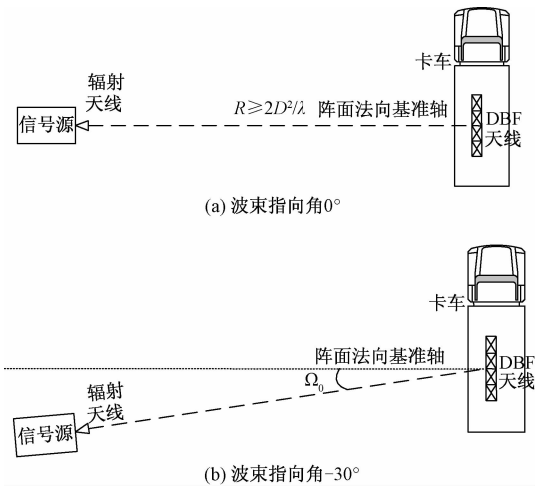


图 1 车载 DBF 天线波束扫描法示意图
Fig 1 Beam scanning method of vehicle DBF antenna

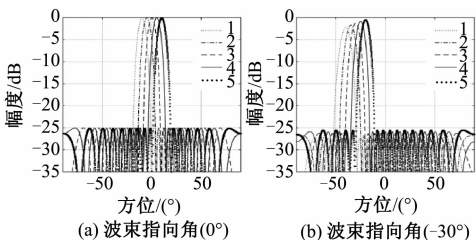


图 2 DBF 多波束天线方向图
Fig.2 DBF multi-beam antenna pattern

3 的波束中心位置定义为波束扫描角. 本文把 DBF 天线在不同波束指向角下的 $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 内的天线方向图作为由常规旋转法测试得到的波束旋转方向图.

2.3 波束扫描方向图

根据波束扫描法的测试流程,波束扫描角从 -60° 变化到 60° 的过程中,记录 DBF 天线接收数据,可依次把波束 1、波束 2、波束 3、波束 4、波束 5 扫描出来. 波束扫描方向图的波束排列顺序与波束旋转方向图的波束排列顺序正好相反,并且关于波束指向角成中心对称. 波束指向角 0° 和 -30° 上的波束扫描方向图如图 3 所示.

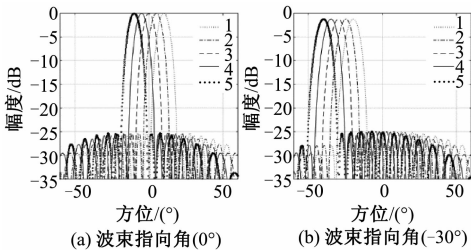


图 3 波束扫描方向图
Fig.3 Beam scanning pattern

3 波束扫描法的测试效果评价

为评价本文提出的 DBF 天线波束扫描法的测试效果,在正常方向图和异常方向图两种情况下将其与常规旋转法作对比. 这里主要考虑波束宽度、副瓣水平、波束指向等天线主要参数.

3.1 正常方向图情况下

正常方向图情况下波束指向角 0° 和 -30° 的波束旋转方向图与波束扫描方向图如图 4 所示.

1) 波束宽度

正常方向图情况下的波束宽度对比情况如表 2 所示.

表 2 正常方向图情况下的波束宽度($^{\circ}$)对比
Table 2 Comparison of beam width ($^{\circ}$) in normal condition

测试方法	常规旋转法		波束扫描法	
指向角/ $^{\circ}$	0	-30	0	-30
波束 1	7.40	9.54	7.26	8.35
波束 2	7.32	8.91	7.26	8.35
波束 3	7.28	8.42	7.26	8.35
波束 4	7.32	8.05	7.26	8.35
波束 5	7.40	7.76	7.26	8.35

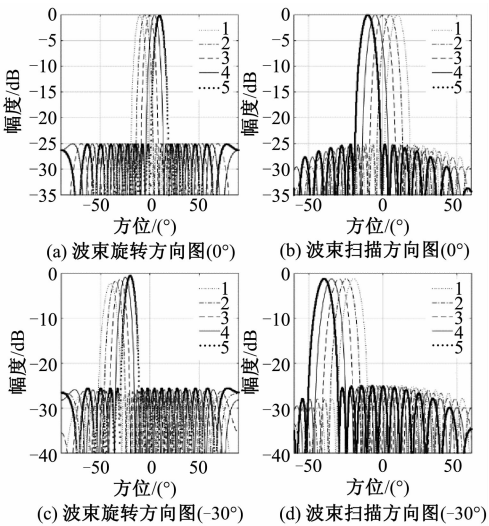


图 4 正常方向图情况下的波束旋转方向图与波束扫描方向图

Fig.4 Beam spinning pattern and beam scanning pattern in normal condition

由常规旋转法得到的波束旋转方向图的波束宽度与波束中心位置有关,其波束中心位置越偏离 0° 即阵面法向方向,主瓣越宽. DBF 天线的这一特点也在利用相邻波束比幅处理判断波束指向时为其带来了固有偏差.

由波束扫描法得到的波束扫描方向图的波束宽度与波束中心位置无关,其波束宽度均相同,只与波束指向角有关,波束指向角越偏离 0° ,波束扫描方向图的主瓣越宽.

波束扫描方向图的波束宽度与波束旋转方向图的宽度相比误差较小,其波束宽度与 5 波束中的中间波束(即波束 3)的波束宽度非常接近,这由式(10)也可体现.

2) 副瓣水平

正常方向图情况下,波束指向角 0° 和 30° 上,常规旋转法得到的五波束副瓣水平均为 -25 dB,波束扫描法得到的五波束副瓣水平均为 -25.18 dB,可见波束扫描方向图的副瓣水平比波束旋转方向图的副瓣水平稍低,低 0.18 dB.

3) 波束指向

如引言所述,DBF 天线通常用相邻波束比幅处理对目标实现测角,本文定义其差波束零点为波束指向. DBF 5 波束可在 4 个方位角上即每相邻的 2 个波束判断波束指向,如表 3 所示. 这里的指向偏差是将固有偏差(由不同波束中心位置 Ω 处天线方向图上的加权值 $\cos(\Omega)$ 不同引入)考

虑进去后得到的真实偏差.

波束指向角 0° 上波束扫描指向偏差小于 0.05° ; 波束指向角 -30° 上波束扫描指向偏差较大, 指向误差小于 0.2° .

表 3 正常方向图情况下的指向偏差 ($^{\circ}$) 对比
Table 3 Comparison of directivity deviation ($^{\circ}$) in normal condition

测试方法	常规旋转法		波束扫描法	
指向角/ $(^{\circ})$	0	-30	0	-30
-7.5 $^{\circ}$ 处	0	0	0.04	0.16
-2.5 $^{\circ}$ 处	0	0	0.01	0.05
7.5 $^{\circ}$ 处	0	0	-0.01	-0.03
2.5 $^{\circ}$ 处	0	0	-0.04	-0.08

3.2 异常方向图情况下

下面讨论方向图异常情况下波束旋转法与波束扫描法的仿真对比情况. 这里将波束 2 仿真为波束指向异常, 将波束 4 仿真为副瓣水平异常, 仿真结果如图 5 所示. 从图 5 的 4 幅图中均可以看出其中一个波束的副瓣水平明显异常.

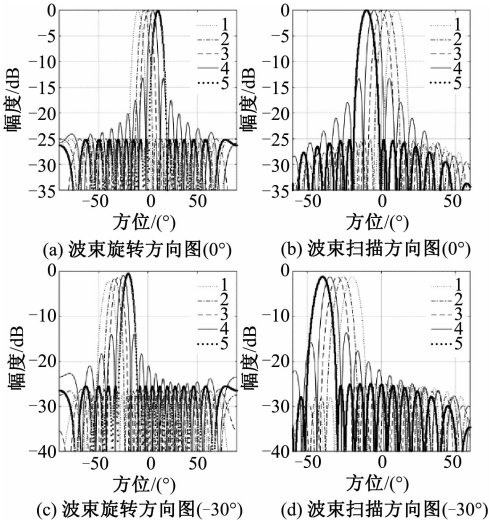


图 5 异常方向图情况下的波束旋转方向图与波束扫描方向图

Fig. 5 Beam spinning pattern and beam scanning pattern in abnormal condition

1) 波束宽度

异常方向图情况下的波束宽度对比情况如表 4 所示.

从表 4 可以看出, 波束指向角 0° 和 -30° 上, 2 种测试方法得到的方向图中, 波束 4 的波束宽度均明显比其他几个波束的波束宽度小,

这说明通过波束扫描法可检查出波束宽度异常的情况.

表 4 异常方向图情况下的波束宽度 ($^{\circ}$) 对比
Table 4 Comparison of beam width ($^{\circ}$) in abnormal condition

测试方法	常规旋转法		波束扫描法	
指向角/ $(^{\circ})$	0	-30	0	-30
波束 1	7.40	9.54	7.26	8.35
波束 2	7.30	8.80	7.26	8.35
波束 3	7.28	8.42	7.26	8.35
波束 4	6.28	6.91	6.24	7.18
波束 5	7.40	7.76	7.26	8.35

2) 副瓣水平

异常方向图情况下的副瓣水平对比情况如表 5 所示.

表 5 异常方向图情况下的副瓣水平 (dB) 对比
Table 5 Comparison of sidelobe level (dB) in abnormal condition

测试方法	常规旋转法		波束扫描法	
指向角/ $(^{\circ})$	0	-30	0	-30
波束 1	-25.00	-25.00	-25.18	-24.18
波束 2	-25.00	-25.00	-25.18	-24.18
波束 3	-25.00	-25.00	-25.18	-24.18
波束 4	-13.15	-13.15	-13.28	-12.38
波束 5	-25.00	-25.00	-25.18	-24.18

从表 5 可以看出, 波束指向角 0° 和 -30° 上, 2 种测试方法得到的方向图中, 波束 4 的副瓣水平明显比其他几个波束的副瓣水平高, 这说明通过波束扫描法也可检查出副瓣水平异常的情况.

3) 波束指向

异常方向图情况下的波束指向对比情况如表 6 所示. 从表 6 可以看出, 波束指向角 0° 上, 波束旋转方向图的 4 个方位角位置上均有指向偏差, -7.5° 和 -2.5° 处的指向偏差较大, 均约为 0.5° , 说明波束 2 的波束指向异常, 2.5° 和 7.5° 处也存在较小指向偏差, 均约为 0.18° , 这主要由波束 4 的波束宽度 (或副瓣水平) 异常造成的. 波束扫描方向图的测试结果与波束旋转方向图的测试结果非常接近. -30° 指向角上, 情况类似, 但测试误差较大. 这说明在较小的波束指向角上通过波束扫描法能很好地检查出波束指向异常的情况.

表 6 异常方向图情况下的波束指向(°)对比

Table 6 Comparison of directivity deviation (°) in abnormal condition

测试方法	常规旋转法		波束扫描法	
指向角/(°)	0	-30	0	-30
-7.5°处	0.51	0.31	0.54	0.44
-2.5°处	0.5	0.22	0.51	0.35
7.5°处	0.18	-0.02	0.17	-0.05
2.5°处	-0.19	-0.39	-0.22	-0.46

4 结束语

本文主要介绍 DBF 天线波束扫描法在方位向的应用情况,该方法在原理上也可用于俯仰向方向图测试. 仿真结果表明波束扫描法能有效地检查出 DBF 天线方向图异常情况. 要特别说明的是,尽管当多个波束指向角 DBF 天线测试时需要移动信号源,使信号源对准波束指向角,这会给该方法的实际应用带来一些麻烦,但根据 DBF 天线的工作原理,实际上只在一个或少数波束指向角上实施测试,就可以判断 DBF 天线正常与否,这使得实际测试过程并不复杂. 与常规旋转法相比,该方法简单有效、实用性强,尤其适用于常规旋转法不易实施的场合.

波束扫描法能得到与常规旋转法相近的测试结果,其不足之处,一是 DBF 天线的背瓣无法测试,二是在大指向角下引入的测试误差较大. 在实际应用过程中,应注意此问题,可通过仿真分析确

定可接受的误差范围.

参考文献

[1] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

[2] 张祖稷,金林,束咸荣. 雷达天线技术[M]. 北京: 电子工业出版社,2005.

[3] Salas-natera M A, Rodriguez-osorio R M, Haro L D. Procedure for measurement, characterization and calibration of active antenna arrays [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(2):377-391.

[4] Skolin M I. 雷达手册[M]. 王军,等译. 北京: 电子工业出版社,2003.

[5] Kopecký P, Zúvodný V. Measurement of far-field patterns of phased array antennas[C]//Microwave Techniques (COMITE), 2015 Conference on. Pardubice,2015:1-3.

[6] 张光义. 多波束形成技术在相控阵雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2007, 29(8): 1-6.

[7] 苏保伟. 阵列数字波束形成技术研究[D]. 国防科学技术大学,2006.

[8] 黄玉学,李其福,桑微. 数字多波束技术信号处理算法研究[J]. 无线电工程,2006, 36(7): 18-20.

[9] 鄢社锋,马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京: 科学出版社,2009.

[10] Van Trees H L, Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.

[11] 戴晴,黄纪军,莫锦军. 现代微波与天线测量技术[M]. 北京: 电子工业出版社,2008.