

室外 2.4 GHz 背腔式缝隙天线的设计

崔 勇,王 勇,杨世武

(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

摘 要:为了解决单极子天线不适合室外使用的问题,设计了一种适合无线终端使用的 2.4 GHz 背腔式缝隙天线.借助数值模型结合具体设计,计算出了背腔深度的理论值,创新性的使用波导内电波传播模型分析了天线背腔深度对天线辐射的影响;利用基于有限元法的 HFSS 对影响天线性能的缝隙长度、背腔深度和馈电位置等参数进行了参数扫描,确定了天线的设计参数;根据仿真结果做出了实物,并进行了测试,实测与仿真结果吻合.实测结果表明:该天线在频段 2.35~2.53 GHz 内, S_{11} 系数小于 -10 dB.相比普通单极子天线,设计的背腔式缝隙天线阻抗匹配性能更好,更适宜于室外环境.

关键词:背腔式缝隙天线;电波传播;有限元法;2.4 GHz

中图分类号:TN823

文献标志码:A

Design of the 2.4 GHz cavity-backed slot antenna for outdoor application

CUI Yong, WANG Yong, YANG Shiwu

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A cavity-backed slot antenna (CBSA) is designed, which can work at 2.4 GHz for wireless application. Firstly, according to the mathematical model and actual design, the theoretical value is calculated and analyzed. The effect on the depth of the cavity to the radiation of the antenna is studied under the wave propagation in the waveguide innovatively. And then with the help of the High Frequency Structure Simulator (HFSS), the parameters such as the length of the slot, depth of the cavity and the feeding place are simulated and determined. At last, the physical antenna is made based on the simulation and tested in the anechoic chamber. The measurement results are same to the simulation results which show that the S_{11} of the proposed antenna is less than -10 dB over 2.35 - 2.53 GHz. Compared to the dipole, the CBSA designed is better at impedance matching for outdoor application.

Key words: cavity-backed slot antenna; wave propagation; finite element method; 2.4 GHz

工业、科学和医学 (Industrial Scientific and Medical, ISM) 频段是给机构开放使用的无线频段,应用这些频段无须许可证或费用. ISM 频段中的 2.4 GHz 频段 (2.4~2.483 5 GHz) 是世界各国通用的免费通信频段,无线局域网 (WLAN)、蓝牙、ZigBee 和无线 USB 等无线网络都可以工作在这个

频段内.目前 2.4 GHz 无线终端常用的天线是单极子天线.在野外环境中,单极子天线有易折损、易丢失和防雷性能差的缺点.

缝隙天线的基本模型最早是由 H. G. Booker 在 1946 年提出^[1],其模型建立在无限大、无限薄的理想金属板上,缝隙假设无限细,其只用来进行理论分

析.1948年,A. F. Stevenson 在《矩形波导上的缝隙天线》^[2]一文里首先提出了具有使用价值的波导缝隙天线.1967年,A. A. Oliner 推出了波导缝隙天线的等效电路表达式^[3],并使用数值方法计算出了宽壁缝隙天线的谐振频率.1974年,C. R. Cockrell 使用坡印廷定理对天线的输入阻抗进行了分析,得到了输入阻抗随背腔深度变化的曲线^[4],这为天线设计提供了理论支持,但是其模型的缺点是假设口面场呈理想化的正弦分布.1977年,S. A. Long 通过实验结果推导出了在一定频率范围、腔体截面和缝隙长度下的天线输入阻抗数学表达式^[5],这个表达式是频率和背腔深度的函数,其实验结果的缺点是没有考虑到馈电位置对天线性能的影响,而且天线的工作频率范围有限.在国内,吴信宝等人虽然使用并矢格林函数简化了矩量法的数值运算^[6],但因为其理论模型是假设缝隙天线位于无限大、零厚度的理想金属板上,所以其低频的数值运算结果与 Long 的实验结果相比有较大误差.背腔式缝隙天线由于难以获得准确的解析理论模型,大多数的分析还都是基于近似数值解,这导致近几十年的相关研究越来越少.但是随着计算机技术的发展,在最近几年中,背腔式缝隙天线受到越来越多人的关注,2008年,陈伟强等人使用微机电技术(MEMS)加工出来工作在 Ka 频段的的天线,其带宽能达到 80%,增益约 6.8 dB^[7].新的加工技术给缝隙天线的性能带来了提升的空间.

过去的数值方法存在着许多不足,经常采用的矩量法虽然理论上计算精度最高,但其计算量通常远高于有限元法和有限差分域法.由于 20 世纪计算机存储和运算能力有限,在用矩量法进行数值分析的过程中,只能解决电小尺寸的问题,还需要做较多的近似处理,计算误差也较大,因此其数值分析结果往往不能直接用于工程实践.

本文作者设计了一种新型的缝隙天线来代替传统的单极子天线.这种缝隙天线采用背腔式结构,通过在金属外壳上开槽得以实现,缝隙为电大尺寸,位于金属盒子的前端和左右两端,平行于底面,其特性类似于折顶偶极子天线.这种天线可以直接当作金属机箱内无线终端设备的天线使用,其具有天线轮廓低、易于设备表面共形和加工工艺简单等优点,并通过覆盖防水材料进行野外防雨处理,因此该天线非常适合野外工作环境.

1 背腔式缝隙天线理论分析

理论电磁学巴比涅原理成立的条件是:1)金属

平板必须是无限大而且没有厚度;2)金属是理想导体;3)缝隙是无限细.基于该原理的数值模型不能直接应用于实际背腔式缝隙天线的理论设计.

实用的背腔式缝隙天线是在拥有背腔的金属平面上进行开缝,其实质是一种带有金属共振器的表面天线,见图 1.与理想缝隙天线相比,背腔式缝隙天线的辐射场只有一个方向,当选取的背腔深度合适时,辐射到背腔的能量可以完全反射,此时背腔式缝隙天线的输入电阻几乎是理想缝隙天线的两倍,跨接并联电纳可以忽略不计.使用 S A Long^[8]的无损截止短路线模型,结合本设计要求,计算得到了 2.4 GHz 半波长缝隙长度下的背腔深度的理论值.

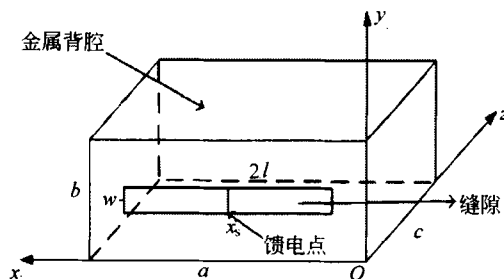


图1 背腔式缝隙天线示意图

Fig.1 CBS antenna

图1中,设金属背腔的长、高和深分别是 a 、 b 、 c ;缝隙的长为 $L = 2l = \lambda/2$;宽为 w .采用文献[8]中的经验公式,将背腔缝隙天线的导纳与理想缝隙天线导纳的一半进行比拟,再结合具体设计,对于长为 $a = 8.2$ cm,高为 $b = 3.7$ cm的金属背腔,在 2.4 GHz 时,背腔内的截止波长 $\lambda_c = 2a = 16.4$ cm,再借用波导波长公式和相移常数公式,可以推导出当背腔的深在 $c = 0.23\lambda_g$ 时,辐射电阻最大.

然而,文献[8]中的数学模型是建立在有限频率范围内.为了验证其结论的普适性,本文创新性是使用金属背腔内电磁波的垂直入射理论分析了背腔深度对天线辐射的影响.

如图2所示,金属背腔可以看成是一端开缝一端短路的矩形波导结构,当平面波入射到金属背腔内时,背腔内电磁场的主模为 TE₁₀ 模,则入射波的电场可以表示为

$$\begin{cases} E_x = j \frac{\omega\mu}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \\ E_y = -j \frac{\omega\mu}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; μ 为磁导率; β 为入射波的波数; $k_c^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2$, a 、 b 为背腔的长边和宽

边; m, n 对应一种模式, 在此 $m = 1, n = 0$. 入射到金属短路平面上的电磁波都被反射回入射波的空间.

反射波的电场为

$$\begin{cases} E_x = -j \frac{\omega\mu}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j\beta z} \\ E_y = j \frac{\omega\mu}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j\beta z} \end{cases} \quad (2)$$

则从波导空间辐射出去的总电场(以 x 方向为例)

$$\begin{cases} E_x = E_m(e^{-j\beta z} - e^{j\beta z}) = -2jE_m \sin\beta z \\ E_m = \frac{\omega\mu}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \end{cases} \quad (3)$$

这是一驻波, 在 $z = -(2n+1)\lambda_g/4$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 处电场最大, 其中 λ_g 为波导波长. 当 $z = -n\lambda_g/2$ 时, 电场为零. 这也论证了背腔深度为 $\lambda_g/4$ 时天线的辐射性能较好的结论.

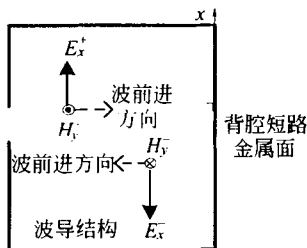


图 2 电磁波垂直入射进金属背腔

Fig. 2 Electromagnetic wave incident into the metallic cavity-backed vertical

为实现辐射的全向性, 本文设计的天线为三侧开缝的全波长缝隙天线. 中心馈电的全波偶极子天线, 其输入阻抗为 $710 + j0 \Omega$ ^[9], 由巴比涅原理可知, 其互补中心馈电的全波缝隙天线的输入阻抗为 $50 + j0 \Omega$. 由于背腔会使天线的输入阻抗加倍, 达到 100Ω , 这就需要通过偏馈来改变天线的输入阻抗. 根据文献[10]可知, 偏馈法是以一定的比列压缩整个阻抗特性, 而不是改变缝隙的并联谐振特性, 对于通过调节背腔深度后使得天线输入阻抗虚部为 0 的全波缝隙天线, 可以使用偏馈的方式来压缩改变其特性电阻, 从而得到阻抗匹配的目的. 偏馈法模型可以等效变压器, 如图 3 所示.

其变压系数和阻抗变换公式为

$$Z_{\text{offset}} = n^2 Z_{\text{slot}} \quad (4)$$

$$n = \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (5)$$

式中: Z_{offset} 为偏馈时的输入阻抗; Z_{slot} 为中央馈电时的输入阻抗; x 是馈源偏离缝隙中心的距离; L 是缝隙长度. 通过改变馈源到中心点的距离 x , 可以改变变压系数 n , 从而使得天线的特性阻抗降低.

对于 50Ω 的同轴馈电线, 馈电位置 $x = 0.25L$.

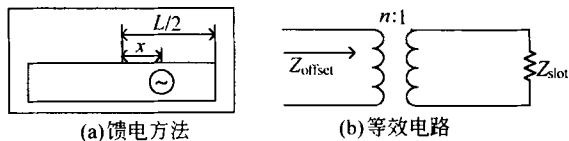


图 3 偏馈法

Fig. 3 Partial feed

由于天线需要在野外工作, 所以要对天线进行防雨处理, 选取防雨材料时要尽可能消除防雨材料对天线产生的介质加载影响. 介质的介电常数越大, 天线输入阻抗中的电抗分量就越小, 辐射能量就会越大, 但是天线的带宽就会变窄. 为了保证足够的带宽而且不影响辐射, 要选择介电常数适中, 电导率尽可能小的介质作为天线的防水材料, 并且防水材料的厚度在保证强度的前提下尽可能的薄.

通过背腔内电磁波入射模型分析和近似数值模型得到了当背腔深度为 $0.25\lambda_g$ 时, 背腔深度使得缝隙天线的辐射电阻为最大的结论. 由于理论模型存在一定的误差, 只能给天线设计做一定的参照, 在天线设计中, 还需使用仿真工具来获得天线设计参数的最优化.

2 背腔式缝隙天线的仿真

通过背腔缝隙天线的理论分析, 可以知道缝隙长度 L 、背腔的深度 c 、馈电位置 x 、腔体内电路板容抗值及高度、防水材料介电常数及厚度等参数都会对天线的性能产生影响. 现在使用基于有限元法的 HFSS 仿真软件对这些参数分别扫描, 查看并分析其对天线 S_{11} 系数的影响. 天线仿真采用变量唯一性的原则对天线 S_{11} 系数的参数进行影响. 通过参数扫描已知电路板的容抗值、高度与防水材料的介电常数、厚度等参数对天线的 S_{11} 系数影响不大, 现在对影响天线 S_{11} 系数较为显著的参数 L 、 c 、 x 进行仿真分析.

首先对影响天线谐振点的缝隙长度 L 进行扫描, 缝隙长度 L 在 $0.8\lambda \sim 1.2\lambda$ 内变化, 背腔深度选为理论中的 $c = 0.25\lambda_g = 4.83 \text{ cm}$, 电路板高度 $h = 1.5 \text{ cm}$, 聚四氟乙烯薄膜的厚度选为 0.08 mm , 馈电位置 $x = 0.25L$. 得到的天线 S_{11} 系数随缝隙长度的变化如图 4 所示.

从图 4 中可看出随着缝隙长度变大, 天线的谐振频率降低. 对于双端开缝的缝隙天线, 缝隙的长度在 λ 左右比较合适, 仿真结果显示为 $L = 13.6 \text{ cm} = 1.088\lambda$. 在缝隙长度 L 确定的前提下, 现在对影响天线谐振频率的另一参数背腔深度 c 进行参数扫

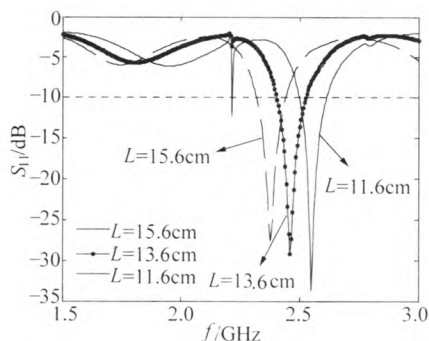


图4 天线的 S_{11} 系数与缝隙长度的关系

Fig.4 Relation between the S_{11} coefficient and the slot length

描. 根据理论分析, 选择背腔深度的扫描区间为 c 等于 $0.2\lambda_g \sim 0.5\lambda_g$. 图5是全波缝隙天线 S_{11} 系数随背腔深度变化的图像.

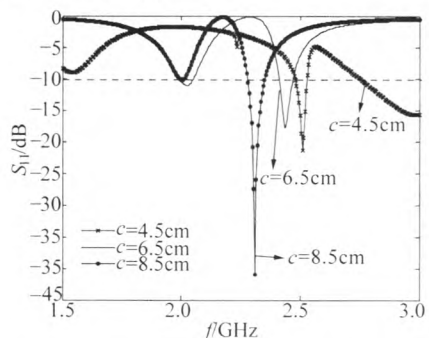


图5 天线的 S_{11} 系数与背腔深度的关系

Fig.5 Relation between the S_{11} coefficient and the cavity depth

从图5中可以看出, 背腔深度 c 越大, 天线的谐振频率越低. 当天线在背腔深度 $c = 6.5 \text{ cm} = 0.32\lambda_g$ 时, 谐振点在 2.4 GHz, 这与理论分析有一定的偏差, 这也说明了天线设计需要合理运用理论与仿真方法.

在缝隙长度和背腔深度确定的前提下 ($L = 1.088\lambda$, $c = 0.32\lambda_g$), 天线的谐振频率就已经确定. 现在对影响天线阻抗匹配的馈电位置进行参数扫描, 馈电方式采用同轴馈电, 通过改变馈电位置进行阻抗匹配. 根据理论分析, 设馈电位置的扫描区间为 $x = 0.1L \sim 0.4L$. 天线的 S_{11} 系数随馈电位置的变化如图6所示.

从图6中可以看出馈电位置的改变对天线 S_{11} 系数影响很大, 当馈电位置在 $x = 2.7 \text{ cm} = 0.2L$ 附近时, 天线的 S_{11} 系数在 2.4 GHz 左右最小, 达到 -23 dB. 背腔内部无线终端含有电阻电容器件, 这些元件可能会改变金属腔体的品质因数 Q , 从而改变天线的辐射性能, 本文作者使用仿真方法对其进行

了分析, 得到的结果显示电路板高度和阻容值对天线性能影响不大.

根据参数扫描的结果可以看出, 仿真结果与理论分析中的结论基本一致. 最后使用 Optimetrics 模块, 得到了天线设计的最优参数.

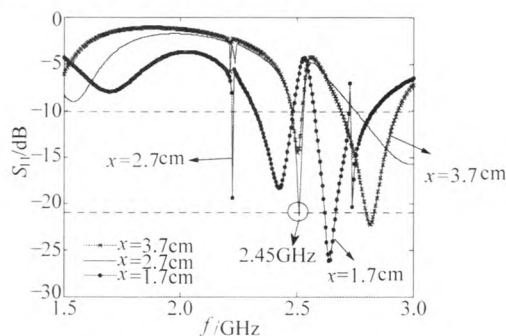
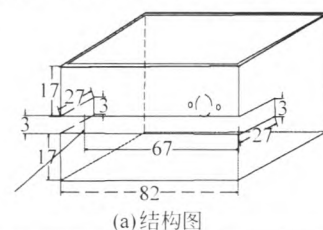


图6 天线 S_{11} 系数与天线馈电位置的关系

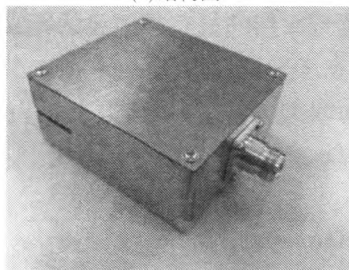
Fig.6 Relation between the S_{11} coefficient and the feed place

3 背腔式缝隙天线实测分析

天线结构与天线实物如图7(a)、图7(b)所示, 使用 HP8720D 矢量网络分析仪对天线的 S_{11} 系数进行了测量. 天线 S_{11} 系数的实测和仿真结果见图8(a)、图8(b), 可以看出实测和仿真结果基本一致, 通过是否加防水薄膜的实测结果的对比, 可以看出防水薄膜对天线性能的影响不大, 不会影响天线的辐射性能.



(a) 结构图



(b) 实物图

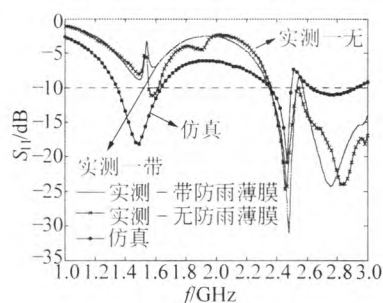
图7 背腔式缝隙天线结构与实物图

Fig.7 Chart of the CBS antenna and real antenna

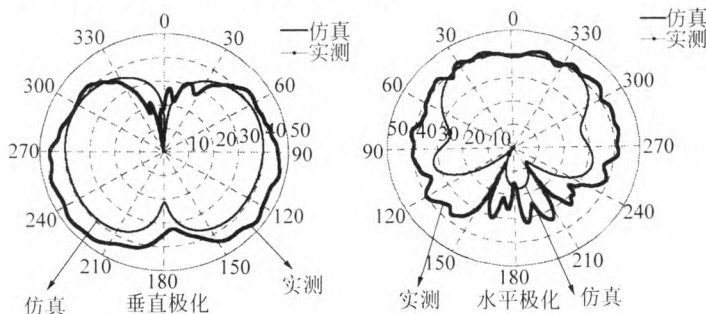
从图8(a)中可以看出缝隙天线的谐振点位于 2.48 GHz 处, $S_{11} = -32 \text{ dB}$, 此时对应的 SWR(驻波比)为 1.06, 阻抗匹配良好. 在频段 2.35 ~ 2.53 GHz 内, 天线的回波损耗小于 -10 dB, 满足 2.4 GHz 无线通信频段工作的需要. 在全电波暗室(ane-

choic chamber)中对天线的方向图进行了测量,图8(b)是实测与仿真的电场强度方向图的对比,极坐标的 0° 对应天线正面的中心处.实测结果与仿真结果基本相仿,这说明加工出来的天线是符合仿真设计

要求的.对比实测的垂直极化和水平极化方向图,可以看出垂直极化是天线的主极化,辐射方向是双侧辐射的,每一侧 3 dB 带宽达到 63.2° ,满足天线低方向性的设计要求.



(a) S_{11} 系数对比



(b) 方向图对比

图8 实测与仿真结果的对比

Fig. 8 Comparison of the test and simulation results

4 结论

本文作者设计中天线结构的最大特点是在承载电路板的金属外壳上直接开缝,形成背腔式缝隙辐射天线;在不影响天线辐射性能的前提下,在缝隙外侧粘贴聚四氟乙烯薄膜以达到防水的目的.通过仿真和实测结果可以得到如下结论.

1)背腔式缝隙天线的谐振频率与缝隙的长度和背腔深度有关,缝隙 L 越长,背腔 c 越深,背腔式缝隙天线的谐振频率越低;2)背腔式缝隙天线的阻抗匹配状态主要与天线的馈电位置 x 有关,可以通过调整馈电位置 x 来实现能量的有效传输;3)天线谐振点处的电压驻波比为1.06,工作频段为 $2.35\sim 2.53\text{ GHz}$,完全可以替代传统的单极子天线.

背腔式缝隙天线的应用场景十分广阔,从民用的无线传感器到军用的机载或舰载的无线收发装置都可以使用.在未来设计中,背腔缝隙式天线可以借鉴微带缝隙天线的优势,突破带宽与增益之间的矛盾,朝着多频点、高增益的方向发展.

参考文献(References):

- [1] Booker H G. Slot aeriels and their relation to complementary wire aeriels[J]. Electrical Engineers-part IIIA: Radiolocation, 1946,93(4): 620-626.
- [2] Stevenson A F. Theory of slot in a rectangular waveguide[J]. Appl Phys, 1948,19: 24-38.
- [3] Oliner A A. Impedance properties of narrow radiating slots in the broad face of rectangular waveguide - part I: theory; part II: comparison with experiment[J]. IRE Trans on Antennas Propagat, 1957,5(1): 594-598.
- [4] Cockrell C R. Input admittance of the rectangular cavity-backed slot antenna[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1976,AP-24:288-294.
- [5] Long S A. Experimental study of the impedance of cavity-backed slot antenna[J]. IEEE Trans Antenna Propagat, 1975,AP-23: 1-7.
- [6] 吴信宝,潘威炎,林为干.背腔式窄缝天线在有耗介质中的特性——激励源位于缝隙口面[J].电波科学学报,1992,7(1):21-29.
WU Xinxiao, PAN Weiyan, LIN Weigan. Quantities of the cavity-backed narrow slot antenna in a lossy medium - the excitation source connected to the slot edges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1992,7(1):21-29. (in Chinese)
- [7] 陈伟强,丁桂甫,黎滨洪.单向宽带毫米波平面缝隙天线的设计与仿真[J].上海交通大学学报,2008,42(4): 625-626.
CHEN Weiqiang, DING Guifu, LI Binhong. Design and simulation of the broadband unidirectional CPW-Fed rectangular slot antenna[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008,42(4): 625-626. (in Chinese)
- [8] Long S A. A mathematical model for the impedance of the cavity-backed slot antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1977,25(6):829-833.
- [9] 克劳斯 约翰.天线[M].章文勋译.北京:电子工业出版社,2011(4): 238-252.
Kraus John D. Antennas: for all applications [M]. ZHANG Wenxun Transla. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011(4): 238-252. (in Chinese)
- [10] 铃木胜裕,曹铁生.缝隙天线偏馈法的研究[J].雷达与对抗,1984(5):31-35.
YU Suzuki, CAO Tiesheng. Research on slot antenna of bias feed[J]. Foreign Ship Technology Radar and Ecm, 1984(5):31-35. (in Chinese)