

文章编号 1005-0388(2007)06-0971-05

等离子体天线的噪声测量及分析

梁志伟^{1,2} 王之江¹ 赵国伟^{1,2} 徐杰^{1,2} 徐跃民¹

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 分析了利用等离子体天线代替金属天线时, 射频系统通讯过程中噪声的来源、大小及其对系统的影响, 并采用不同的测量方法通过无线电综合测量仪和频谱仪两种仪器得到等离子体天线馈端在 HF/VHF 不同频段的系统等效噪声温度。实验结果表明等离子体天线可以代替金属天线用于射频通讯。

关键词 等离子体天线, 射频通讯, 等效噪声温度, 灵敏度

中图分类号 TM937.4, TN911.4, TL61+2.4

文献标识码 A

Noise measurement and analysis of plasma antenna

LIANG Zhi-wei^{1,2} WANG Zhi-jiang¹ ZHAO Guo-wei^{1,2} XU Jie^{1,2} XU Yue-min¹

(1. Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The noise source and its magnitude of the plasma antenna and their affects on the performance of the radio communication system were discussed. By employing the RF communications test set and spectrum analyzers, the noise temperature of the feed end of plasma antenna was measured at the HF/VHF band by two methods. The experimental results show the plasma antenna can be applied in radio communication instead of the traditional metal antenna.

Key words plasma antenna, radio communication, noise temperature, sensitivity

1 引言

近年来, 随着通讯和雷达系统的迅速发展, 对天线的应用和需求也相应地发生变化。这些新的需求包括可靠性和对方向性与频率的快速重构, 特别对于军用通讯, 要求设计宽带低雷达散射截面天线, 加强天线的隐身特性。而利用等离子体代替传统的金属材料作为传导媒质可以满足上述要求^[1]。

等离子体天线是用等离子体作为传导媒质的射频天线, 它由充满低气压气体的绝缘管构成。通过将射频功率脉冲加载到放电管可以快速产生或熄灭等离子体, 这样可以实现天线的快速开关特性。当等离子体点亮时, 等离子体具有电传导特性, 因此可以作为无线电信号的传导媒质。当等离子体熄灭时天线不会产生反射雷达波, 具有隐身效果。由于等

离子体可以通过电气控制其特性, 而金属则是通过机械控制, 因此等离子体天线可以实现在微秒量级对天线的形状、频率、带宽、方向性、增益等的动态重构, 从而在天线设计方面等离子体天线具有比传统金属天线更多潜在的优势^[2,3]。

射频系统性能优劣的一个重要指标是系统的噪声特性, 因此利用等离子体天线代替金属天线时, 对系统通讯过程中噪声的来源、大小和度量方法及其对系统的影响的研究, 将是决定等离子体天线是否适用于射频通讯的基础。

2 物理背景

2.1 等离子体天线辐射特性

自由电子的运动使等离子体或电离气体具有某些电特性^[4]。在无磁场作用下, 等离子体相对介电

常数为 $\epsilon_r = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$, 这里 ω 为波传播圆频率, 等离子体电子圆频率 $\omega_p^2 = n_e e^2 / m_e \epsilon_0$, n_e 为等离子体电子密度, e 为电子电荷, m_e 为电子质量。

对放电管里的等离子体来说, 等离子体电子频率大约为 10GHz。因此等离子体有两个重要的与电磁波相关的特性:(1)对频率高于等离子体电子频率的电磁波, $\epsilon_r < 1$, 等离子体按色散关系有 $\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$, k 为波矢, 等离子体以波长 λ/ϵ_r 传播电磁波, λ 为真空中波长。所以, 理论上可以通过改变等离子体密度等参数实现电气控制辐射方向图;(2)对于频率低于等离子体频率的电磁波, 介电常数小于零, 等离子体类似于金属, 自由空间电磁波不能穿透, 并被反射。利用电离层反射进行无线电通讯就是这个原理。

然而对于一段封闭等离子体的绝缘管, 在等离子体和绝缘管的分界面, 存在一种表面波模式, 它是逐渐耗散的, 但却能够沿边界面传播。这种等离子体表面波类似于金属天线中波传播的性质, 因此在频率远低于等离子体频率的波段, 可以利用等离子体代替传统金属作为天线的传导媒质。目前, 实验证明表面波可以在 3MHz~2.5GHz 范围内形成等离子体柱, 对于频率远低于等离子体频率的表面波可以近似于光速传播, 类似于在金属和绝缘体分界面上传播的性质。

2.2 等离子体天线噪声

评价一个射频系统的性能优劣时, 一个很重要的指标是噪声系数。当等离子体天线用于收发信号时, 分辨并控制由等离子体自身引入的噪声是影响通讯系统性能的关键。在部分噪声测试实验中, 等离子体放电管甚至被作为微波波段的标准噪声源使用^[5]。在直流或低频交流激励低气压辉光放电管存在大量的噪声源, 包括:(1)电子无规则运动引起的热噪声, 用电子温度表示的噪声功率谱为 $S_n = 4KT_e(W/Hz)$; (2)直流电流引起的散粒噪声 $S_i = 2eI_{DC}(A^2/W)$; (3)包括热发射和二次发射的阴极处理过程; (4)离子等离子体频率附近的噪声^[6]。但对表面波激励, 只有热噪声和离子等离子体振荡频率附近的噪声是主要的噪声源。

3 实验设计

实验中等离子体天线由一封闭低气压(10mTorr~1Torr)气体的绝缘管构成。一般放电管可以在两端分别加载电压使气体电离, 而表面波可以从管的一端激励产生等离子体, 简化了等离子体天线设计。激励形成的等离子体柱的长度决定于激励功率的大小, 且等离子体长度随加载激励功率的平方根递增^[7]。

等离子体天线系统用于通讯时, 至少需要两路信号:一路用于激励和维持等离子体, 另一路则用于收发传输信号。尽管由很多表面波激励方式, 但本实验采用了射频电容耦合激励。如图 1 所示, “1”路为激励源, 频率为 150MHz;“2”路为通讯信号, 工作在 HF/VHF 频段。实验中设计了专用的滤波器以使信号最大程度的耦合进入等离子体, 减少功率反射, 实验中匹配网络的驻波比小于 2。

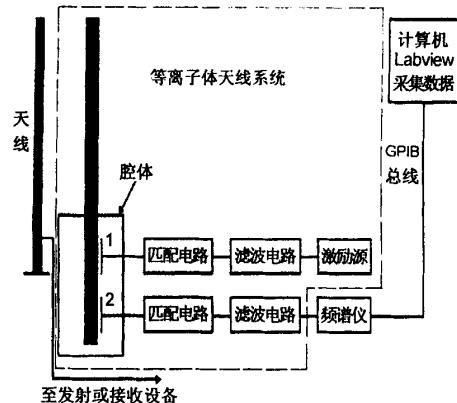


图 1 等离子体天线系统原理框图

处于暗室中的金属天线可以看作为等效噪声温度为标准噪声温度 290K(相当于 -174 dBm/Hz 或 0.025eV)的电阻器, 而通过射频电容耦合产生的低温等离子体, 电子温度在 $10^4 \sim 10^5$ K^[8](相当于 -158 dBm/Hz~ -148 dBm/Hz 或 1~10eV)。当等离子体作为天线应用时, 天线馈端的系统温度是很重要的指标, 因此实验中并没有采用传统的低温等离子体诊断方法直接测量等离子体的电子温度, 而是参考噪声测量的方法, 即用无线电综合测量仪和频谱仪分别先测量了仪器的本底噪声, 然后再推算得到等离子体天线馈端的系统温度 T_a 。

3.1 通过综合测量仪测试等离子体天线馈端的系统温度

3.1.1 测试系统描述

通常描述电台的灵敏度是指在电台中产生一个可懂音频输出的最小射频信号, 一般用 12 dB 信纳比衡量。电台信纳比 $SINAD = 20\log(S+N+D)/(N+D)$, 其中 S 表示信号电平; N 和 D 分别表示噪声和失真分量。测试灵敏度时, 对于 VHF 频段的电台, 从无

无线电综合测量仪的射频信号端输出标准调频信号,一般规定调制频率为1 kHz,正弦波频偏为3 kHz,其载波频率为电台的接收频率,加在电台天线接入端口。调整电台的音频输出功率,使它不小于50%的额定功率。经过解调得到1 kHz的音频正弦调制信号,然后将电台的音频输出端口信号送入综测仪音频输入端,显示出信纳比值。调节综测仪的高频输出至信纳比为12 dB时,综测仪的射频输出功率即为电台的灵敏度。而对于HF频段的电台,只要调整综合测量仪的载波频率比电台标准频率高1 kHz(上边带)或低1 kHz(下边带),采用调幅模式就可以得到电台的灵敏度^[9,10]。

因此,参照电台灵敏度的测量方法,设计一套测试系统用于测量等离子体天线系统馈端的系统温度。

本系统的测量原理框图如图2所示。等离子体天线系统被外部完全屏蔽,天线的信号输出端口和综测仪的射频输出端口通过合路器接入短波或超短波电台。合路器的隔离度为30~45 dB,差损 L_d =3.5 dB,可以认为天线的噪声和综测仪的输出射频信号经过一定衰减后同时输入进电台当中,两路信号没有发生串扰。实验中,同时利用标准噪声源代替等离子体天线可以计算得到电台自身的噪声温度。标准噪声源的超噪比ENR=14.4 dB,折算噪声温度 $T_d=8277\text{K}$ 。

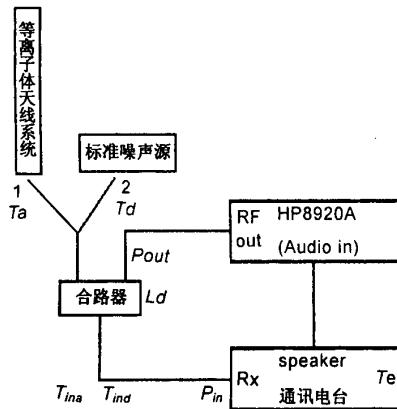


图2 综合测量仪测试系统框图

3.1.2 测量原理

图2中 T_e 为等离子体天线系统馈端的系统温度; T_d 为标准噪声源温度; T_{in} 和 T_{ind} 为等离子体天线和噪声源分别经过合路器输入到电台的噪声温度; T_e 为电台等效噪声温度; L_d 为合路器差损; P_{out} 为综合测量仪输出的射频功率; P_{in} 为综合测量仪经

过合路器后输入到电台的射频功率,用dB表示时, $P_{in} = P_{out} - L_d$ 。

当综合测量仪的信纳比为12 dB时,即为电台在叠加了外部噪声(等离子体天线噪声或噪声源噪声)后的输入灵敏度 $P_{in,min}$ 。

电台输入灵敏度

$$P_{in,min} = KB(T_{in} + T_e)(SNR)_{o,min} \quad (1)$$

式中, K 是波尔兹曼常数, $K=1.38 \times 10^{-23}(\text{J/K})$; B 为系统带宽,正常取为末级中频滤波器的带宽; T_{in} 为外部输入噪声; $(SNR)_{o,min}$ 为系统要求的最小输出信噪比^[11]。

用dB表示时

$$P_{in,min} (\text{dBm}) = K(T_{in} + T_e)(\text{dBm}/\text{Hz}) + 10\log B + (SNR)_{o,min} (\text{dB}) \quad (2)$$

当标准噪声源接入合路器时,由图2可推得

$$T_{ind} = T_d/L_d + (1-1/L_d) \times T_0 \quad (3)$$

式中 T_d/L_d 为标准噪声源经合路器后产生的噪声温度; $(1-1/L_d) \times T_0$ 是由合路器产生的噪声温度。将 T_{ind} 代入式(2),即可以推出

$$T_e = 10^{\frac{P_{ind,min} - 10\log B - (SNR)_{o,min}}{10} - 3} / K - T_{ind} \quad (4)$$

式中, $P_{ind,min} = P_{out,min} - L_d$ 为当标准噪声源接入合路器时,综合测量仪经过合路器后输入到电台的最小射频功率。 $P_{out,min}$ 为综合测量仪输出的射频功率,可以直接从仪器上读出。

当将等离子体天线系统接入合路器时,在 T_e 已知的情况下,按照上述推导则可以反推得到等离子体天线系统馈端的系统温度

$$T_a = L_d T_{in} - (L_d - 1) T_0 \quad (5)$$

式中

$$T_{in} = 10^{\frac{P_{ina,min} - 10\log B - (SNR)_{o,min}}{10} - 3} / K - T_e \quad (6)$$

$P_{ina,min} = P_{outa,min} - L_d$ 为当等离子体天线接入合路器时,综合测量仪经过合路器后输入到电台的最小射频功率。

3.2 通过频谱仪测量等离子体天线馈端系统温度

3.2.1 测试系统描述

本系统的测量原理框图如图1所示。等离子体天线系统被外部屏蔽,天线的信号输出端口直接接入频谱仪。由于等离子体天线内噪声并不完全符合高斯分布,因此实验中并没有通过频谱仪直接读出系统的噪声功率谱密度,而是通过测量一定带宽内的噪声功率,然后再推算出系统的噪声功率谱密度。

3.2.2 测量原理

当频谱仪输入端口接一标准50Ω负载时,频谱

仪的本底噪声功率为

$$F_f = K(T_0 + T_f)B \quad (7)$$

用 dB 表示时

$$F_f(\text{dBm}) = K(T_0 + T_f)(\text{dBm}/\text{Hz}) + 10\log B \quad (8)$$

式中, T_0 为环境温度, $T_0 = 290\text{K}$; T_f 为频谱仪的等效噪声温度; B 为系统带宽。由此可以推出

$$T_f = 10^{\frac{F_f - 10\log B}{10}} - 3 / K - T_0 \quad (9)$$

当等离子体天线接入频谱仪时, 等离子体天线系统与频谱仪总的合成噪声功率 F_t 为

$$F_t = K(T_a + T_f)B \quad (10)$$

用 dB 表示时,

$$F_t(\text{dBm}) = K(T_a + T_f)(\text{dBm}/\text{Hz}) + 10\log B \quad (11)$$

式中, T_a 为等离子体天线系统馈端的系统温度, 同上述推出

$$T_a = 10^{\frac{F_t - 10\log B}{10}} - 3 / K - T_f \quad (12)$$

4 实验结果及讨论

实验中分别测量了 HF 频段和 VHF 频段的等离子体天线馈端的系统温度 T_a 。由于通讯电台的限制, 且为了让结果具有可比性, 两种方法中所选频点一致, 其中 HF 频段选择了 10 MHz、20 MHz 和 28 MHz 三个频率, VHF 频段选择了 229 MHz 单个频率。表 1 给出了通过综合测量仪进行多次测量后, 各个频点的等离子体天线馈端的平均系统温度和相应的噪声功率谱密度, 表 2 则给出了通过频谱仪进行多次测量后的结果。

如表 1、2 所示两种实验方法测量结果相近, 分析实验数据发现:

(1) 等离子体天线馈端的系统温度在 VHF 频段与低温等离子体的电子温度相近, 大约为 1.2eV, 因此在 VHF 频段等离子体天线的噪声可以看作由

于电子无规则运动引起的热噪声, 其特性与低温等离子体的电子温度分布相似。

(2) 等离子体天线馈端的系统温度在 HF 频段比 VHF 频段高出约 20 dB, 对应电子温度几十甚至上百 eV, 远大于低温等离子体的电子温度。分析其原因可能来源于两个方面。其一是射频激励源的影响。对于工作在 229 MHz 频率的等离子体天线激励功率不足十瓦, 而工作在 HF 频段的等离子体天线激励功率需要几十瓦。实验过程中发现随着激励功率的增大, 等离子体天线的馈端噪声温度也随之增大。由于腔体中电磁屏蔽不完全, 且激励源输出的 150 MHz 信号是由低频率的晶振的倍频产生, 因此尽管在腔体输出端口分别加了滤波电路, 但较大的激励功率仍然可以产生交调失真, 从而耦合进入到通讯端口形成噪声。

原因之二可能是由于离子等离子体振荡频率附近的噪声。对于表面波激励, 离子等离子体频率附近的噪声是主要的噪声源。实验测试表明等离子体密度大约为 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 对应等离子体电子频率 f_{pe} 为 900~2850 MHz, 等离子体德拜长度 λ_{DE} 约为 $5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。根据离子等离子体频率 $f_{pe} = f_{pe}(m_e/M_i)^{1/2}$, m_e 为电子质量, M_i 为 Ar 离子质量, 因此推断离子等离子体频率 f_{pe} 大概在 3~11 MHz。在此频段可能存在离子静电波或者离子声波。但是因为离子声波为低频长波, 需满足条件 $k_0 \lambda_{DE} \ll 1$ (k_0 为波数), 且此条件下离子声速 C_s 大约为 $2 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。由于离子声波圆频率 $\omega_s = C_s k_0$, 因此要求离子声波的频率 f_s 远小于 6 MHz。同时由于离子静电波在大波数时为接近于离子等离子体频率的恒频波, 且实验中测量系统的带宽较窄(最大仅为 1 MHz), 因此在 10 MHz 频率等离子体天线馈端的系统温度升高可以推断为由离子静电振荡形成离子静电波引入的噪声。

表 1 综合测量仪测得的天线馈端系统温度和噪声功率谱密度

	10MHz	20MHz	28MHz	229MHz
系统温度(K)	1.562×10^6	9.828×10^5	4.891×10^5	1.281×10^4
噪声密度(dBm/Hz)	-136.7	-138.8	-141.7	-157.5

表 2 频谱仪测得的天线馈端系统温度和噪声功率谱密度

	10MHz	20MHz	28MHz	229MHz
系统温度(K)	2.367×10^6	1.066×10^6	4.109×10^5	1.601×10^4
噪声密度(dBm/Hz)	-134.9	-138.3	-142.5	-156.6

5 结论

通过上面的测量和分析可以看出:

(1)当表面波激励产生的柱状等离子体代替金属天线作为传导媒质时,热噪声和离子等离子体振荡引入的噪声是主要的噪声源。

(2)对于工作在VHF频段的标准接收机来说,仪器的本底噪声大约在-155 dBm/Hz,对应的电子温度为2eV,所以在等离子体天线与接收机组成的系统中,系统本底噪声为-153 dBm/Hz,仅仅增加了2 dB。因此工作在VHF频段的等离子体天线,其馈端的等效噪声温度的增加并不会明显影响天线的通讯性能。

(3)对于工作在HF频段的等离子体天线,通过改进腔体和激励源的设计,同时设置天线的工作频率远离离子等离子体振荡频率,等离子体天线仍然可以代替传统的金属天线。

总之,从噪声的角度考虑,等离子体天线完全可以代替金属天线用于射频通讯系统中,其实现技术是可行的。

参考文献

- [1] G G Borg, I V Kamenski, J H Harris, D G Miljak and N M Martin. Plasma antennas [EB/OL]. Australian National University web page: [Http://www.rphysse.anu.edu.au/~ggb112/docs/radio_club.html](http://www.rphysse.anu.edu.au/~ggb112/docs/radio_club.html)
- [2] G G Borg, J H Harris, N M Martin, D Thorncraft, R Milliken, D G Miljak, B Kwan, T Ng and J Kircher. Plasmas as antennas: Theory, experiment and applications [J]. Physics of Plasmas, 2000, 7(5):2198-2202.
- [3] 赵国伟,徐跃民,陈诚.柱形等离子体辐射场和阻抗的数值计算[J].物理学报,2006,55(7):3458-3463.
- [4] M Moisan, A Shivarova and A W Trivelpiece. Experimental investigations of the propagation of the surface wave along a plasma column [J]. Plasma Physics, 1982, 24(11):1331-1400.

- [5] T S Laverghetta. Handbook of Microwave Testing [M]. Norwood, MA: Artech House, 1981, 144.
- [6] 徐家鸾,金尚宪.等离子体物理学[M].北京:原子能出版社,1981,313.
- [7] J P Rayner, A P Whichello and A D Cheetham. Physical Characteristics of Plasma Antennas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(1):269-281.
- [8] R Hippler, S Pfau, M Schmidt, and Karl H Schoenbach(Eds.). Low Temperature Plasma Physics[M]. New York: Wiley, 2001, 301.
- [9] GB/T12193-1990,移动通信调频无线电话接收机测量方法[S].
- [10] GB/T6394-1995,短波单边带接收机电性能测量方法[S].
- [11] 陈邦媛.射频通信电路[M].北京:科学出版社,2002.



梁志伟 (1981—),男,江苏人,中国科学院空间科学与应用研究中心博士生,研究方向为低温等离子体、电磁兼容和天线理论与技术。

E-mail: lzw@cssar.ac.cn



王之江 (1976—),男,内蒙古人,中国科学院空间科学与应用研究中心博士后,研究方向为低温等离子体诊断技术、表面波与等离子体相互作用理论,电磁场理论计算。



赵国伟 (1979—),男,江苏人,中国科学院空间科学与应用研究中心博士生,研究方向为等离子体数值模拟、电磁场理论计算。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>