

倾斜放置二维数字阵列雷达天线参数优化

邹永庆, 汪伟, 吴瑞荣

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 介绍了二维相控阵或二维数字阵列天线锥形扫描与俯仰、方位扫描时的坐标变换, 重点阐述了倾斜放置二维相控阵或二维数字阵列天线按俯仰、方位扫描时的坐标变换关系, 基于该坐标变换, 得出倾斜放置二维平面相控阵或二维平面数字阵列天线扫描区域边界在变换域上呈椭圆形的结论。基于这样的结论, 可以实现对阵面倾斜角度、几何参数的优化。

关键词: 二维数字阵列; 扫描空域; 阵面优化; 坐标变换

中图分类号: TN911.72; TN821+.8 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2008)06-0481-05

Geometric Parameter Optimization for Tilted-Back Planar 2D Digital Array Antenna

ZOU Yong-qing, WANG Wei, WU Rui-rong

(No. 38 Research Institute, CETC, Hefei 230031, China)

Abstract: Two coordination transforms are introduced firstly for 2D phased array or digital array when the beam performs conical and elevation row-by-row scanning and azimuth sector scanning respectively. And another coordination transform relation is proposed for planar 2D phased array or digital array whose face is tilted back and beam performs row-by-row scanning in elevation and sector scanning in azimuth. Based on the proposed transform, one quite distinct character is discovered that all the scan borderlines of planar 2D phased array or digital array are elliptic, and the array face tilt-back angle and geometric parameters can be optimized easily by employing the ellipse equation.

Key words: 2D plane digital array; scan borderline; antenna parameter optimization; coordination transform

1 引言

二维相控阵或二维数字阵列天线阵面的设计是天线设计的重要内容, 良好的阵面参数设计可以节省单元数量。对天线阵面参数的优化与天线扫描空域要求密切相关, 所以在优化设计天线阵面之前需要明确阵列的扫描空域。该扫描空域的研究在变换域上是十分方便的, 阵列的扫描空域通常分为圆锥扫描空域、方位扇扫和俯仰逐行扫描等。

本文首先对圆锥扫描的坐标变换和空域, 方位扇扫、俯仰逐行扫描的变换和空域进行了分别介绍, 提出了适合倾斜放置二维相控阵或二维数字阵列天线按俯仰、方位扫描时的坐标变换关系,

并基于这样的坐标变换关系, 导出其扫描区域在变换域上呈椭圆形的重要结论, 得到对阵面倾斜角度、阵面几何参数优化的解析方法。

2 扫描空域分析的变换域方法

2.1 圆锥扫描空域及其坐标变换

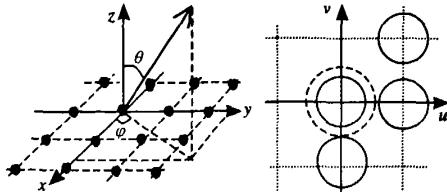
二维相控阵的波束指向在球坐标系下可用变量 (φ, θ) 表示, 如图1所示。当天线波束扫描位于圆锥内, 可应用坐标变换^[1]:

$$\begin{cases} u = \sin\theta \cos\varphi \\ v = \sin\theta \sin\varphi \\ \varphi \in [0, 2\pi], \theta \in [0, \pi/2] \end{cases} \quad (1)$$

得: $u^2 + v^2 = \sin^2\theta \quad (2)$

由式(1)可知, 圆锥扫描的边界是半径为 $\sin\theta$

的圆，在 uv 平面内实空间的边界为单位圆。从图1可以看出，可利用分析或几何的方法将栅瓣控制在实空间以外，并能对相控阵几何结构进行优化^[2]。



(a) 圆锥扫描坐标描述 (b) 圆锥扫描变换域上扫描边界
图1 圆锥扫描坐标描述与变换域上扫描边界示意图

2.2 方位扇扫俯仰逐行扫描空域及其坐标变换

如果平面相控阵采用对称的俯仰行扫、方位扇扫，其坐标变换可以写为^[3]

$$\begin{cases} \zeta = \cos\theta \sin\varphi \\ \eta = \sin\theta \\ \varphi \in [-\pi/2, \pi/2], \theta \in [-\pi/2, \pi/2] \end{cases} \quad (3)$$

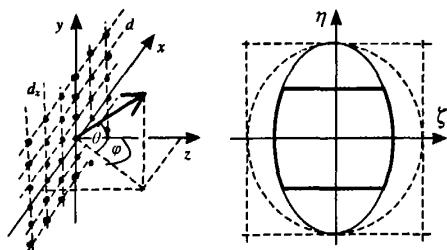
由式(3)可知，扫描区域为一椭圆，其长轴为1，短轴为 $|\sin\varphi_{\max}|$ 。可用椭圆方程表示为

$$\frac{\zeta^2}{\sin^2\varphi} + \frac{\eta^2}{1} = 1 \quad (4)$$

根据式(3)、(4)可知，如果相控阵扫描范围在 $\varphi \in [-\varphi_m, \varphi_m]$ 和 $\theta \in [-\theta_m, \theta_m]$ 内，则其在 $\zeta-\eta$ 平面内的扫描边界可以表示为

$$\begin{cases} -\sin\theta_m \leq \eta \leq \sin\theta_m \\ \frac{\zeta^2}{\sin^2\varphi_m} + \frac{\eta^2}{1} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

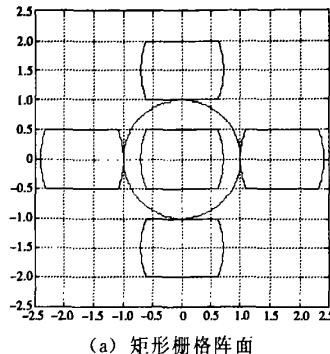
图2表示这个变换的示意图，其中，椭圆和两个直线围成的封闭区域为对称的俯仰行扫、方位扇扫的范围，在图中以黑色实心粗线表示。



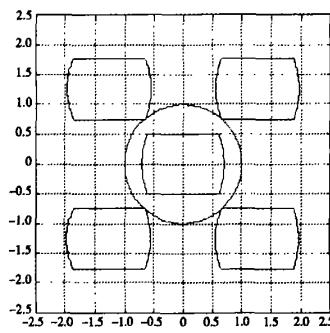
(a) 波束指向的坐标描述 (b) 变换域上的扫描边界
图2 垂直放置二维阵列波束指向的坐标描述与变换域上的扫描边界

若二维相控阵天线的布阵形式为矩形或三角形栅格布阵，则它的主瓣和相邻栅瓣的扫描边界可

用图3表示，其中图3(a)表示采用矩形栅格布阵的情况，图3(b)表示采用三角形栅格布阵的情况。



(a) 矩形栅格阵面



(b) 三角形栅格阵面

图3 垂直放置的二维阵列变换域上扫描边界

由图3可知，可用分析^[3]或几何^[2-5]的方法控制相控阵的几何参数，以避免在实空间中出现栅瓣。当阵面倾斜放置时，俯仰扫描范围是不对称的（如图8），此时阵面的倾斜角和阵的几何参数的优化相当重要。

3 阵面倾斜放置扫描空域及其坐标变换

文献[3,5]中讨论了优化阵几何参数的图形或分析的方法，但对在变换空间内的扫描边界问题却未提及。此外对于后向斜放的阵面，也未明确说明用理论分析优化其几何参数。本文将对这些重点讨论。

如图4所示，假设相控阵阵面后向倾斜角在地球坐标系中为 γ ，将地球坐标系 (X, Y, Z) 向阵平面 (k_x, k_y, k_z) 投影，则可由式(3)快速得到此时的坐标变换关系：

$$\begin{cases} k_x = \cos\theta \sin\varphi \\ k_y = \sin\theta \cos\gamma - \cos\theta \cos\varphi \sin\gamma \end{cases} \quad (6)$$

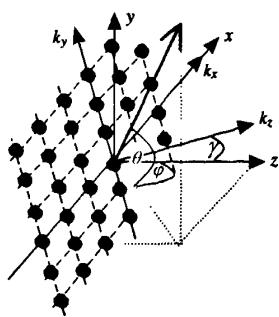
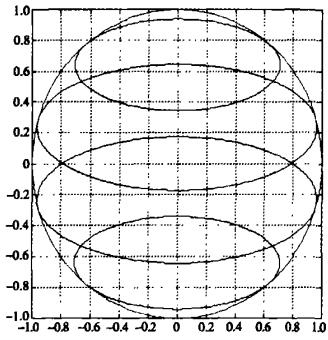


图4 倾斜阵面的坐标变换示意图

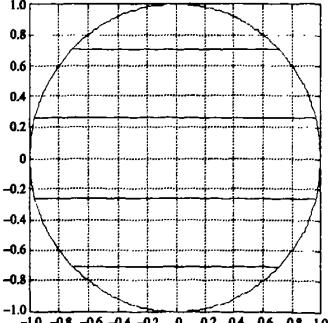
如果阵面的后向倾斜角 γ 和俯仰角 θ 不变,可将式(6)写成如下形式:

$$\frac{k_x^2}{\cos^2 \theta} + \frac{(k_y - \sin \theta \cos \gamma)^2}{\cos^2 \theta \sin^2 \gamma} = 1 \quad (7)$$

由式(7)可知,在单位圆内嵌着一族椭圆,所有的椭圆与单位圆相切,交点为椭圆长轴的顶点,如图5(a)所示。若阵面倾斜角 $\gamma=0$,椭圆变成单位圆内的一簇直线,如图5(b)所示,此时式(6)与式(3)一致。



(a) 阵面倾放置



(b) 阵面垂直放置

图5 俯仰空域边界仿真结果

类似地,若阵面倾斜角 γ 和方位面扫描角 φ 不变,式(6)可以写为

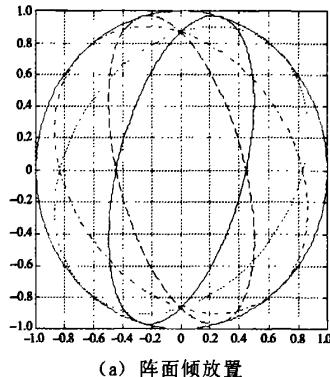
$$\begin{cases} k_x = A_1 \cos \theta \\ k_y = A_2 \cos(\theta + \alpha) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $A_1 = \sin \varphi$

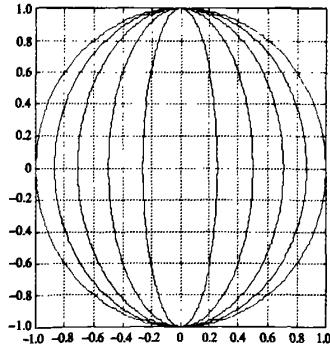
$$A_2 = \sqrt{\cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi \sin^2 \gamma}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \gamma}{\cos \varphi \sin \gamma} \right) + \pi$$

由式(8)可知,单位圆内包含一族倾斜的椭圆,这些椭圆与单位圆相切,且它们的长轴为1。而且所有的椭圆都经过点 $(k_x, k_y) = (0, \pm \cos \gamma)$,如图6(a)所示。若阵面倾斜角 $\gamma=0$,从图6(b)可看出,这些椭圆不再是倾斜,此时式(8)与式(3)一致,图6(b)与图2相同。



(a) 阵面倾放置



(b) 阵面垂直放置

图6 方位边界仿真结果

若二维相控阵的阵面仅向后倾斜,方位面的扫描边界为单位圆内两相交的倾斜椭圆外边界部分,为“桃”形,如图7(a)所示;垂直面的扫描边界是横向椭圆的一部分,如图7(b)所示。

综合考虑两个面同时扫描,若相控阵的扫描角范围:方位面为 $\varphi_m^- = -60^\circ$ 和 $\varphi_m^+ = +60^\circ$,俯仰面为 $\theta_m^- = 0^\circ$ 和 $\theta_m^+ = 55^\circ$,阵面倾斜角 $\gamma = 15^\circ$,则其扫描边界形状如图8所示。

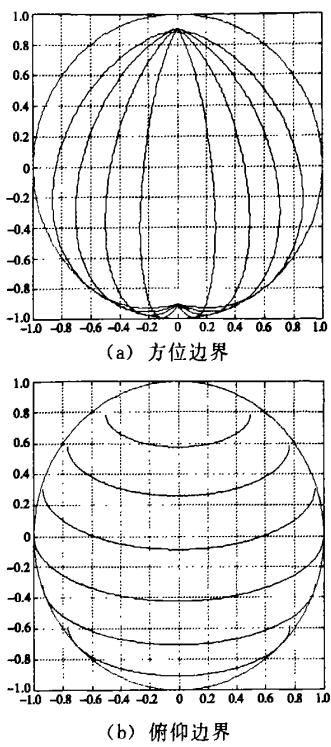


图7 倾斜放置天线阵面前方空域边界

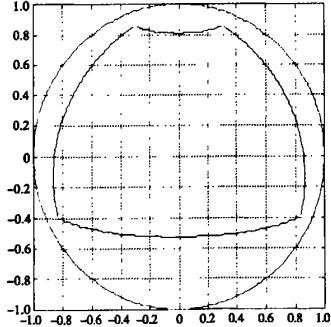


图8 倾斜二维阵列在变换域上的空域边界

4 倾斜安装的二维阵列优化

相控阵几何参数的设计原则是避免栅瓣进入可见空域,即须将图9中4个椭圆控制在单位圆外。若天线阵面倾斜角为 γ ,当相控阵的布阵方式为矩形栅格,可用式(9)~(12)分析。

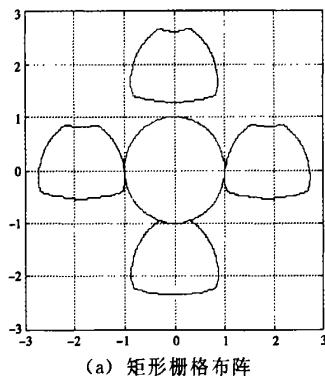
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_x^2}{\cos^2 \theta_m^-} + \frac{(k_y - \sin \theta_m^- \cos \gamma + \lambda/d_y)^2}{\cos^2 \theta_m^- \sin^2 \gamma} = 1 \\ k_x \in [\cos \theta_m^- \sin(-\varphi_m), \cos \theta_m^- \sin(\varphi_m)] \\ k_y \in [\sin \theta_m^- \cos \gamma - \cos \theta_m^- \cos(-\varphi_m) \sin \gamma, \sin \theta_m^- \cos \gamma - \cos \theta_m^- \cos(\varphi_m) \sin \gamma] \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_x^2}{\cos^2 \theta_m^+} + \frac{(k_y - \sin \theta_m^+ \cos \gamma - \lambda/d_y)^2}{\cos^2 \theta_m^+ \sin^2 \gamma} = 1 \\ k_x \in [\cos \theta_m^+ \sin(-\varphi_m), \cos \theta_m^+ \sin(\varphi_m)] \\ k_y \in [\sin \theta_m^+ \cos \gamma - \cos \theta_m^+ \cos(-\varphi_m) \sin \gamma, \sin \theta_m^+ \cos \gamma - \cos \theta_m^+ \cos(\varphi_m) \sin \gamma] \\ k_x = \sin \varphi_m^- \cos \theta + \lambda/d_x \\ k_y = \sqrt{\cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi_m^- \sin^2 \gamma} \cdot \cos[\theta + \tan^{-1}(\frac{\cos \gamma}{\cos \varphi_m^- \sin \gamma} + \pi)] \\ \theta \in [\theta_m^-, \theta_m^+] \\ k_x = \sin \varphi_m^+ \cos \theta - \lambda/d_x \\ k_y = \sqrt{\cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi_m^+ \sin^2 \gamma} \cdot \cos[\theta + \tan^{-1}(\frac{\cos \gamma}{\cos \varphi_m^+ \sin \gamma} + \pi)] \\ \theta \in [\theta_m^-, \theta_m^+] \end{array} \right. \quad (11)$$

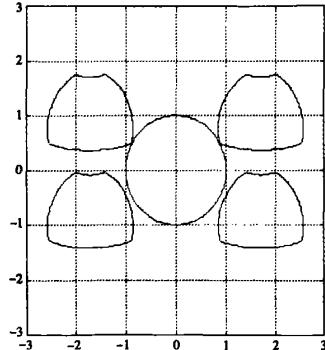
式中, φ_m^- , φ_m^+ 为方位面左、右最大扫描角; θ_m^- , θ_m^+ 为俯仰面上、下最大扫描角。

当布阵方式为三角形栅格时,可用下面方程进行分析:

$$\sqrt{(k_x - \cos \theta_m^- \sin \varphi_m^-)^2 + (k_y - \sin \theta_m^- \cos \gamma + \cos \theta_m^- \cos \varphi_m^- \sin \gamma)^2} > 1$$



(a) 矩形栅格布阵



(b) 三角形栅格布阵

图9 布阵优化仿真

5 结论

提出倾斜放置的二维相控阵或者数字相控阵的坐标变换,同时分析了不同情况下的扫描区域,据此引入了相控阵优化的分析方法,此方法对平面相控阵或数字相控阵的阵面优化设计具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] Mailloux R J. Phased Array Antenna Handbook[M]. Boston, MA: Artech House, 1994: 26-31.
- [2] Sharp E D. A Triangular Arrangement of Planar-Arrary Elements That Reduces the Number Needed[J]. IRE Trans on AP, 1961, 9(2): 126-129.
- [3] Zou Y, Zhang Y, Cao J, et al. Coordinate Transform Suitable for Row-by-Row Elevation Scanning and Azi-

(上接第462页)

6 结束语

本文针对宽带数字均匀线性阵列,作了瞬时带宽理论的分析,推出了传统相控阵的带宽限制的经验公式;只有通过每个阵元时延才能彻底克服孔径效应。为此设计出了分数时延滤波器对收发信号实现数字波束形成,考虑硬件实现的精度、复杂性,采用子阵时延,阵内各天线单元移相的方案,并在S波段进行了仿真。仿真结果表明,分数时延滤波器可有效地克服孔径效应,主瓣指向不随带宽的变化而偏移、展宽。随着采用分数时延的子阵数增加,波束图效果会越好。

参考文献:

- [1] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1(1): 11-16.
WU Man-qing. The Development of Digital Array Radar[J]. Journal of CAEIT, 2006, 1(1): 11-16. (in Chinese)
- [2] 朱庆明. 数字阵列雷达评述[J]. 雷达科学与技术, 2004, 2(3): 136-141.
ZHU Qing-ming. An Overview of Digital Array Radar Development [J]. Radar Science and Technology, 2004, 2(3): 136-141. (in Chinese)
- [3] Cantrell B, De Graaf J, Leibowitz L, et al. Development of a Digital Array Radar(DAR)[C]// Proceed-

muth Sector Scanning Planar Phased Array[C]// IEEE International Conference on Radar, Shanghai, China: [s. n.], 2006: 500-503.

- [4] Nelson E A. Quantization Sidelobes of a Phased Array with a Triangular Element Arrangement [J]. IEEE Trans on AP, 1969, 17(3): 363-365.
- [5] Corey L E. A Graphical Technique for Determining Optimal Array Antenna Geometry[J]. IEEE Trans on AP, 1985, 33(7): 719-726.

作者简介:



邹永庆 男, 1963年出生于安徽, 1988年合肥工业大学硕士研究生毕业, 硕士学位, 现为中国电子科技集团公司第三十八研究所研究员, 主要研究方向为天线与微波技术, 获国防科技进步奖多项, 在国内外公开发表研究论文近30余篇。

ings of IEEE Radar Conference, Atlanta, GA: [s. n.], 2001: 157-162.

- [4] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 383-451.
- [5] 龚耀寰. 自适应滤波和智能天线[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] 高瑜翔. 光控相控阵列系统及其关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [7] 张直中. 论宽带相控阵雷达的战术优越性[J]. 电子学报, 1993, 21(3): 86-91.
Zhang Zhizhong. Tactical Advantages of Quasi-Wide-Band Phase Array Radar[J]. Acta Electronica Sinica, 1993, 21(3): 86-91. (in Chinese)
- [8] Valimaki V. Discrete-Time Modeling of Acoustic Tubes Using Fractional Delay Filter[D]. Finland: Helsinki University of Technology, 1995.
- [9] Laakso T I, Valimaki V, Karjalainen M, et al. Splitting the Unit Delay: Tools for Fractional Delay Filter Design[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(1): 30-60.

作者简介:



成超 男, 1983年生于山西省榆次市, 现就读于电子科技大学电子工程学院, 为信号与信息处理专业的硕士研究生, 主要从事宽带数字阵列雷达的研究, 包括发射波束形成的理论、宽带数字T/R组件设计与关键技术实现研究。

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>