

GNSS 接收机天线相位中心改正的影响分析

张碧波^{1*},李江卫²,熊佑祥³,孙伟²

(1. 天门市勘察测绘研究院,湖北 天门 431700; 2. 武汉市测绘研究院,湖北 武汉 430022;
3. 武汉市汉南区勘察测量队,湖北 武汉 430090)

摘 要:GNSS 天线相位中心改正包括天线相位中心偏差(PCO)和天线相位中心漂移改正(PCV)。PCV 随接收的卫星的高度角、方位角等而变化。在测量作业中,为将接收机天线的瞬时相位中心与实际测量应用联系起来,通常要知道天线瞬时相位中心与天线量测参考点(ARP)之间的关系,并采用特定的模型进行 PCV 改正。本文介绍了 GNSS 接收机天线相位中心改正的相关模型与方法,结合具体算例分析了其对静态和实时数据的影响。
关键词:GNSS 天线;相位中心偏差;相位中心漂移;天线参考点

1 引 言

GNSS 观测是通过伪距及载波相位计算的卫星天线相位中心至接收机天线相位中心之间的距离,IGS 精密星历和 GNSS 广播星历所给出的卫星在轨位置信息均是基于卫星的质心,而卫星质心与卫星天线相位中心存在一定的偏差,两者并不重合。另外,随着卫星的位置和高度角的变化,GNSS 接收机天线相位中心与平均相位中心之间的偏差也将发生变化,因而在测量数据处理中,存在接收机天线的平均相位中心与瞬时真实载波相位中心不一致而产生的接收机天线载波相位中心偏差。根据相关研究,这种偏差可以达到 1 cm~2 cm^[1,3,7]。因此,对于精密测量而言,卫星相位中心改正与接收机天线相位中心改正均是必须考虑的因素之一。本文主要针对 GNSS 天线相位中心改正方法及其影响进行讨论。

2 GNSS 接收机天线相位中心改正

GNSS 天线相位中心改正包括:天线相位中心偏差 PCO(Phase Center Offset)和天线相位中心漂移改正 PCV(Phase Center Variation)。PCO 指的是天线平均相位中心与天线参考点 ARP(Antenna Reference Point)之间的偏差,而 PCV 指的是天线平均相位中心与瞬时相位中心之间的变化,该变化量随着卫星的高度角、可视卫星的空间结构以及天线方位等而变化。对于高精度的 GNSS 数据处理,不仅要考虑天线相位中心偏差 PCO、天线相位中心变化 PCV、而且还要考虑 GPS 接收机天线整流罩(Radomes)对天线相位中心

的影响^[2,6,7]。GNSS 天线相位中心改正方法包括相对相位中心改正(只考虑接收机天线)和绝对相位中心改正(同时考虑卫星天线和接收机天线)。

在 GNSS 测量中,能够直接得到的是地面标石到天线参考点或者天线盘面上某些可量测到的几何点之间的垂高或斜高。因此,在 GNSS 数据处理时,首先需要将这个高度改化为瞬时相位中心与地面标石间的距离。地面标石到瞬时相位中心的高度改化 \vec{H} 分为三部分^[5],如图 1 所示:

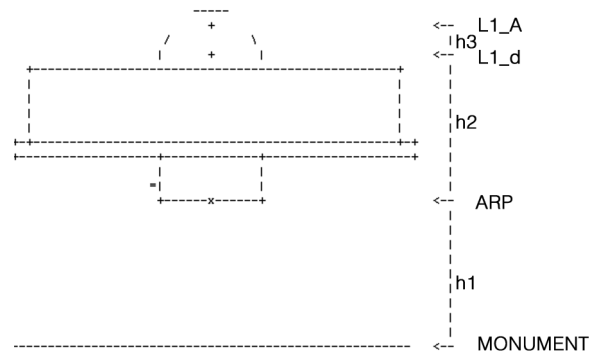


图 1 天线高组成示意图

$$\vec{H} = \vec{h}_1 + \vec{h}_2 + \vec{h}_3 \tag{1}$$

式中, \vec{h}_1 表示地面标石到天线参考点 ARP 之间的高度,即外业实际量测的天线垂高;当外业量测为天线斜高时,可依据天线直径、天线参考点 ARP 至天线平均相位中心的垂直方向偏差等参数按勾股定理计算得到; \vec{h}_2 表示天线参考点 ARP 到平均相位中心的偏移,即天线相位中

* 收稿日期:2014—04—22
作者简介:张碧波(1973—),男,注册测绘师、工程师,主要从事测绘新技术应用及测绘管理工作。
基金项目:精密工程与工业测量国家测绘局重点实验室开放基金(PF2011-6)

心偏移 PCO; h_3 表示瞬时相位中心相对于平均相位中心的变化在垂直方向的影响,即 PCV 的高程影响分量。

2.1 接收机天线相位中心偏差 PCO

L1 和 L2 载波各自的天线相位中心偏差值可从 GNSS 天线生产厂家或 IGS(International GPS Service)、NGS(National Geodetic Survey)根据其天线类型查取得到。接收机生产厂家或 IGS、NGS 提供的相位中心偏差常用局部坐标,即天线相位中心相对于 ARP 的垂直方向偏差 ΔH 、北向偏差 ΔN 和东向偏差 ΔE 表示。因此,在进行改正时,需要通过旋转将局部坐标系中的偏心向量转换至地固系^[2,6,7],即:

$$\Delta r_{\text{ant}} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & -\cos\lambda\sin\varphi & \cos\lambda\cos\varphi \\ \cos\lambda & -\sin\lambda\sin\varphi & \sin\lambda\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta H \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, λ 、 φ 为测站的大地经度和纬度。
PCO 也可以按照下式直接对相位观测值进行改正^[2,6]:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\lambda} \frac{(r_R - r_S)^T \Delta r_{\text{ant}}}{|r_R - r_S|} \quad (3)$$

式中 r_S 和 r_R 分别为卫星和测站在地固系中的位置矢量, λ 为波长。

2.2 接收机天线相位中心漂移改正 PCV

自 2006 年 11 月开始,IGS 使用绝对相位中心改正模型(IGSyy_www,其中 yy、www 表示模型发布的年份和周),取代至 1996 年开始采用的相对天线相位中心模型。绝对相位中心模型考虑了卫星天线相位中心变化,并顾及了接收机天线的方位角、整流罩的影响^[2,6],改正模型的精确性在实际高精度 GNSS 数据处理中得到了检验,从而被广泛应用于 GNSS 精密数据处理。

PCV 改正方法有以下 3 种^[4,5,8]:

(1)NONE:对天线相位中心变化不进行改正,即 $\Delta X_{L_1} = \Delta X_{L_2} = 0$ 。

(2)ELEV:将 PCV 看成是卫星高度角的函数,采用多项式对 L_1 和 L_2 的单差残差进行拟合,得出由相位中心随高度角变化而引起的观测值的变化^[3],从而进行后续数据处理,即 PCV 为:

$$\Delta\varphi'(z) = \sum_{i=0}^{n_{\max}} c_i z^i \quad (4)$$

其中, $\Delta\varphi'(z)$ 为相位中心在卫星高度角为 z 时的 PCV, n_{\max} 为拟合多项式的最阶数, c_i 为拟合系数。

图 2 为 NGS 给出的某型号接收机天线的 PCV 随卫星高度角的 L1、L2 改正数及其改正残差:

TRM_R6		NONE L1/L2 Integrated										NGS (2) 06/11/13	
1.8	1.5	104.5											
0.0	0.6	1.5	2.8	4.0	5.3	6.3	7.1	7.6				7.6	
7.2	6.3	5.0	3.2	1.1	-1.2	-3.8	0.0	0.0					
-1.1	0.7	88.0											
0.0	-0.7	-0.4	0.4	1.6	2.9	4.0	4.9	5.4				5.5	
5.0	4.2	2.8	1.0	-1.0	-3.1	-5.1	0.0	0.0					
RMS MM		RMS - 2 MEASUREMENTS											
0.1	0.3	0.7											
0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2				0.2	
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0					
0.3	0.2	0.2											
0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2				0.2	
0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0					

图 2 不同高度角 PCV 改正数及改正误差图

(3)AZEL:将 PCV 看成是卫星高度角和方位角的函数。即 PCV 表示为以卫星高度角和方位角为参数的球谐函数^[3],其数学表达式为:

$$\Delta\varphi'(\alpha, z) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\cos 2z) (a_{nm} \cos m\alpha + b_{nm} \sin m\alpha), \quad (m_{\max} \leq n_{\max}) \quad (5)$$

其中, $\Delta\varphi'(\alpha, z)$ 为相位中心在卫星方位角为 α 、高度角为 z 时的 PCV, \tilde{P}_{nm} 为 n 阶、 m 次标准化的缔合勒让德函数, a_{nm} 、 b_{nm} 为谐函数系列参数。

图 3 为 NGS 给出的某型号接收机天线的 PCV 随卫星高度角的 L1、L2 改正数及其改正残差:

TRMR6	NONE		TYPE / SERIAL NO										METH / BY / # / DATE																								
FIELD	NGS		2 13-NOV-06																																		
0.0	0.0	80.0	5.0																																		
2																																					
NGSRA_1788																																					
CONVERTED FROM RELATIVE NGS ANTENNA CALIBRATIONS																																					
G01	2.38	1.13	86.35	0.87	0.78	0.68																															
NOAZI	0.00	0.37	0.60	0.87	0.78	0.68																															
-1.35	-1.18	-0.51	0.67																																		
G01																																					
G02	-1.18	0.11	80.35	-0.68	-0.19	0.32																															
NOAZI	0.00	-0.83	-0.91	-0.68	-0.19	0.32																															
-1.83	-2.33	-2.61	-2.35																																		
G02																																					
G01	0.1	0.3	0.7	0.1	0.2	0.2																															
NOAZI	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2																															
0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0																																
G01																																					
G02	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2																															
NOAZI	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2																															
0.3	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0																																
G02																																					
END OF FREQ RMS																																					
END OF ANTENNA																																					

图 3 不同卫星高度角、方位角的 PCV 改正数及改正误差图

按照 IGS 公布的 ANTEX (ANTenna Exchange, 天线数据交换格式) 1.3 版的说明, 采用绝对相位中心改正模型时; 卫星天线只考虑位于 $0^{\circ} \sim 14^{\circ}$ 天底角范围内的一维相位中心变化改正, 改正值每隔 1° 给出; 接收机天线同时考虑卫星位于 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的天顶角、 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 方位角范围内的二维相位中心变化改正, 这两类改正值每隔 5° 给出。对于非格网点上的改正, 可以通过一定的算法内插得到。

在实际应用中, 可根据卫星当前历元的天顶角和方位角确定天线相位中心偏差改正所在的格网, 再根据四个格网点的天顶角、方位角以及相位中心偏差改正采用双线性模型内插确定该卫星实际的改正, 双线性内插数学模型如下:

$$f(\alpha, z) = (1-x)(1-y)f(l, l) + x(1-y)f(l, r) + (1-x)yf(u, l) + xyf(u, r) \tag{6}$$

式中: $f(\alpha, z)$ 是卫星天顶角为 z 、方位角为 α 时的相位中心偏差改正; $x = \frac{z-z_0}{\Delta E}$, ΔE 为格网高度角间隔,

一般为 5° , z_0 为左下角格网点对应的天顶角; $y = \frac{\alpha-\alpha_0}{\Delta A}$, α_0 为左下角格网点对应的方位角, ΔA 为格网方位角间隔, 其值一般为 5° ; $f(l, l)$ $f(l, r)$ $f(u, l)$ $f(u, r)$ 分别为左下角、左上角、右下角、右上角格网点的 PCV 改正数值。

3 算例分析

为分析 GNSS 天线相位中心改正的影响, 选取武汉市连续运行卫星定位服务系统 (WHCORS) 1 d 的观测数据进行处理与分析。数据整理阶段, 采用 TE-QC 软件将 24 h 的原始数据分割为两个 12 h 的观测文件, 采样率 10 s。接收机均为 Trimble NetRS, 接收机天线有两种型号, 除 WHKC 参考站为 TRM39105 天线外, 其余参考站均为 TRM41249 天线。

基线解算软件采用 GAMIT10.32, 分别采用 RPCV (相对相位中心改正模型) 和 APCV (绝对相位中心改正模型) 两种模式进行解算; 网平差软件采用 COS-AGPS, 固定 WHCD 的三维坐标, 在 WGS84 框架下进行三维无约束平差。最终得到的其余 8 个参考站的坐标差值如图 4 所示, 图中 (x, y) 为经高斯投影后的 WGS-84 平面坐标, h 为大地高:

从图 4 可以看出: 采用 ELEV 和 AZEL 两种模式进行基线解算, 再采用相同的平差设置, 处理后参考站的水平坐标差值较小, 最大的只有 0.6 mm; 高程差值

明显大于平面差值, 而与固定点 WHCD 使用不同类型天线的 WHKC 站高程差值要明显大于其他参考站, 所有的高程差值都在 2 mm 以内。

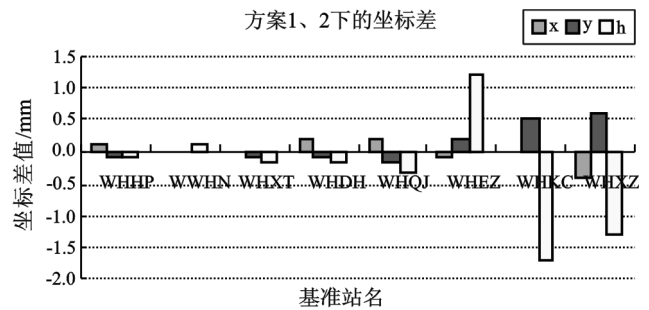


图 4 APCV 与 RPCV 解算参考站坐标差值

为分析 APCV 对实时数据处理的影响, 选取 WHKC 和 WHQJ 两个参考站 (基线长 133 km) 2 h 的数据进行了分析处理。图 5 为两测站 G16、G31 卫星在观测期间的高度角变化图; 图 6 为两测站 G16、G31 卫星在观测期间的经 PCV 改正后的双差相位残余项的变化图:

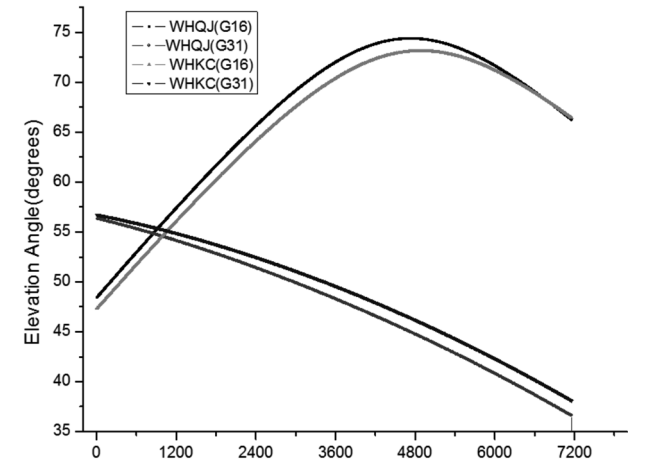


图 5 测站卫星高度角变化图

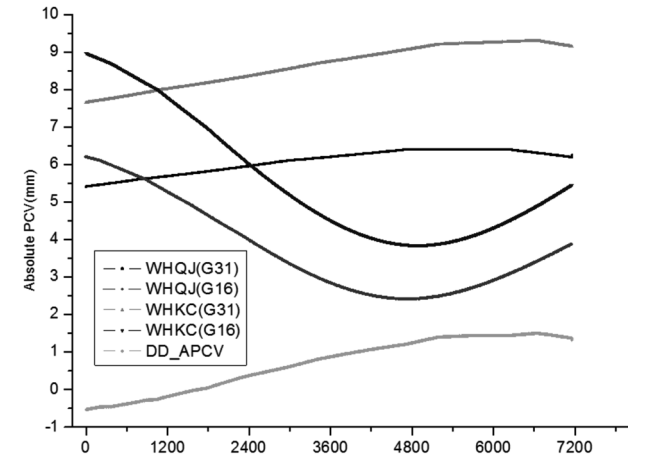


图 6 测站 PCV 及其双差残余变化图

图 6 表明: 由于天线类型不同, 不同测站相同卫星

经 PCV 改正后的差值可达 4 mm 左右,基线间双差残余项的影响仍达 2 mm 左右。

因此,可以认为:对于相距不远的测站(通常小于 35 km),在基线解算设置相同的情况下,天线相位中心变化双差残余项对平面坐标的影响很小,可以忽略;对于使用同类型接收机天线的测站,高程差异明显小于不同类型天线的结果,而对于使用不同类型接收机天线的测站,对高程的影响也不一样,其差异与天线性能及插值算法有关。因此,高精度 GNSS 测量中应尽量使用相同类型的接收机天线,并采用一定的改正算法,以削弱天线相位中心改正残差对高程的影响。

4 结 语

通过以上分析,得到以下结论及建议:

(1)对于相距不远的测站(35 km 以内),卫星天线相位中心变化双差残余项的影响可以忽略;

(2)在天线定向标志指北的情况下,使用同类型接收机天线,相位中心变化双差残余项的影响较小,大多数情况下是可以忽略的;使用不同类型接收机天线,相位中心变化双差残余项的影响不可以忽略。

针对于实际工程控制测量,建议:

①为避免不同类型天线相位中心双差残余项的影响,在实际测量时,最好采用同类型天线测量,且在架设天线时所有天线的定向标志指北;

②虽然常用基线处理软件提供了多种相位中心模型选项,建议使用 IGS 的绝对相位中心改正模型。

参考文献

- [1] Markus Rothacher. Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations [J]. GPS Solutions, 2001, 4 (4): 55 ~ 60.
- [2] Ralf Schmid, Peter Steigenberger, Gerd Gendt, et al. Generation of a Consistent Absolute Phase Center Correction Model for GPS Receiver and Satellite Antennas [J]. Journal of Geodesy, 2007, 81: 781 ~ 798.
- [3] 郭际明, 史俊波, 汪伟. 天线相位中心偏移和变化对高精度 GPS 数据处理的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(12): 1143 ~ 1146.
- [4] 周命端, 郭际明, 郑勇波等. 卫星天线相位中心偏移对 GPS 精密单点定位精度的影响研究[J]. 测绘通报, 2008 (10): 8 ~ 13.
- [5] 田雪冬, 郭际明, 郭麒麟等. GNSS 定位技术在水利水电工程中的应用[M], 长江出版社, 2009.
- [6] S. Y. Zhu, F. -H. Massmann, Y. Yu, et al. Satellite antenna phase center offsets and scale errors in GPS solutions [J]. Journal of Geodesy, 2003, 76(11-12): 668 ~ 672.
- [7] Ralf Schmid, Markus Rothacher, Daniela Thaller et al. Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas—Impact on global GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna [J]. GPS Solutions, 2005, 9(4): 283 ~ 293.
- [8] 余龙飞, 张姣姣, 吴桂栋等. GPS 天线相位中心偏差的削弱方法[J]. 城市勘测, 2013(6): 106 ~ 108.

The Antenna Phase Center Variation Impact of GNSS Receiver

Zhang Bibo¹, Li Jiangwei², Xiong Youxiang³, Sun Wei²

(1. Tianmen Reconnaissance and Mapping Institute, Tianmen 431700, China;

2. Wuhan Geomatic Institute, Wuhan 430022, China;

3. Hannan Reconnaissance and Mapping Institute, Hannan 430090, China)

Abstract: The antenna phase center correction of GNSS receiver is consist of the phase center offset (PCO) and the phase center variation (PCV). PCV is the difference from the instantaneous phase center to the average of antenna phase center and varies with the elevation and azimuth of the signal source. In order to geometrically relate the instantaneous phase center of the receiver antenna to the relevant survey monument, we need to know the relationship between the instantaneous phase center and the physical antenna reference point (ARP) using the phase center variation (PCV) model. This paper first describes the antenna phase center models and discussion of the PCV correction algorithm, then demonstrates how the PCV model switch affects coordinate estimations of static and real-time surveying with processing of local engineering networks.

Key words: GNSS antenna; phase center offset; phase center variation; antenna reference point

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，一直致力和专注于微波、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>