

# 基于矢量网络分析仪的喇叭天线增益测量<sup>①</sup>

周严东 刘震 刘汝兵 林麒

(厦门大学航空航天学院福建省等离子体与磁共振重点实验室 福建厦门 361005)

**摘要:** 利用微波暗室、矢量网络分析仪、角锥喇叭天线以及电脑等设备建立了一套喇叭天线测量系统;采用两相同天线法,分别测量了4~6 GHz、6~8 GHz角锥喇叭天线的增益值,对测量数据进行误差分析和近距修正;并将增益的实测值与理论计算值进行对比。实验结果表明,近距修正后,所测量的4~6 GHz与6~8 GHz频段天线的增益实测值与理论值的最大偏差值分别为-0.20 dB和-0.19 dB,均在±0.25 dB范围内,符合标准增益天线增益的精度要求,也与天线出厂的指标相符,表明所建立的测量系统对于喇叭天线增益的测量有效可行。

**关键词:** 矢量网络分析仪 角锥喇叭天线 增益测量 近距修正

中图分类号: TN823.15

文献标识码: A

文章编号: 1674-098X(2017)01(c)-0092-05

## Horn Antenna Gain Measurement Based on Vector Network Analyzer

Zhou Yandong Liu Zhen Liu Rubing Lin Qi

(Fujian Key Laboratory of Plasma and Magnetic Resonance, School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian, 361005, China)

**Abstract:** A set of horn antenna measurement system was set up by microwave anechoic chamber, vector network analyzer, computer and other equipment. The pyramidal horn antenna gain of the two horn antennas which were 4~6GHz and 6~8GHz were measured by the two same antenna method, at the same time, making error analysis and correction of near distance measurement data, and then compared the theoretical calculation value with the measured value of gain. The experimental results show that, after correction of near distance measurement, the maximum deviation of the measured and theoretical values are respectively as -0.20dB and -0.19dB, and they are within 0.25dB. The results are consistent with the requirements of standard gain antenna and manufacture index, and also show that the measurement system established measurement for horn antenna gain is effective and feasible.

**Key Words:** Vector network analyzer; Horn antenna; Gain measurement; Correction of near distance

增益是天线极为重要的一个参数,可以衡量天线辐射能量的集中程度和朝一个特定方向收发信号的能力。角锥喇叭天线经常作为测量标准增益喇叭天线增益的参考天线,角锥喇叭天线近场增益定标的准确性决定了与近场增益相关的一系列参量的准确度。

目前,国内各计量机构均难以保证角锥喇叭天线近场增益的准确定标,如果从国外进口带有计量机构定标数据的角锥喇叭天线,其一个频率点的定标数据的价格甚至高于天线本身价格,所以目前国内角锥喇叭天线所用的天线增益值往往都是理论值<sup>[1]</sup>。但理论值和实际值存在差异,因此,如何准确地测量出实际值,对喇叭天线近场增益准确定标进行研究是很有必要的。

本文基于矢量网络分析仪建立了一套喇叭天线测量系

统,利用两相同天线法对4~6 GHz和6~8 GHz(X波段)的角锥喇叭天线的增益值进行测量,并对测量结果进行近距

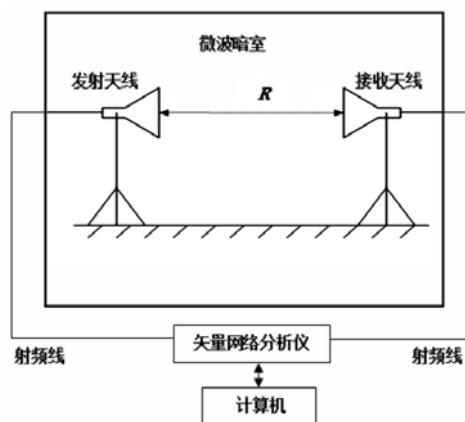


图1 实验测量系统

①基金项目:中航工业创新基金产学研项目(项目编号:cx y2013XD28)。

作者简介:周严东(1990,9—),男,汉,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向:电磁场与微波技术。

林麒(1954,5—),女,汉,福建厦门人,博士,教授,研究方向:电磁场与微波技术。

表1 4~6 GHz喇叭天线实测增益值

频率/ GHz	实测1/ dB	实测2/ dB	实测3/ dB	实测4/ dB
4.0	15.872	15.874	15.874	15.871
4.2	16.056	16.057	16.058	16.054
4.4	16.312	16.312	16.314	16.310
4.6	16.568	16.569	16.570	16.566
4.8	16.795	16.796	16.797	16.793
5.0	16.989	16.990	16.991	16.987
5.2	17.170	17.171	17.172	17.168
5.4	17.364	17.365	17.366	17.362
5.6	17.577	17.578	17.579	17.575
5.8	17.784	17.785	17.786	17.782
6.0	17.964	17.963	17.965	17.961

表2 6~8 GHz喇叭天线实测增益值

频率/ GHz	实测1/ dB	实测2/ dB	实测3/ dB	实测4/ dB
6.0	16.477	16.478	16.479	16.478
6.2	16.649	16.650	16.650	16.650
6.4	16.810	16.811	16.811	16.811
6.6	16.961	16.962	16.962	16.962
6.8	17.111	17.112	17.112	17.112
7.0	17.260	17.261	17.261	17.261
7.2	17.402	17.403	17.403	17.403
7.4	17.541	17.542	17.542	17.542
7.6	17.695	17.696	17.696	17.696
7.8	17.876	17.877	17.877	17.877
8.0	18.073	18.074	18.074	18.074

修正。将修正后的测量结果与喇叭天线增益的理论计算值相比较,验证了该文所建立测量系统的测量精度和测量方法的正确性,同时也验证了所测天线的增益特性,此外,测量结果还验证了天线出厂的技术指标是否准确可靠。

### 1 测量系统

图1所示为实验测量系统,由微波暗室、角锥喇叭天线、射频线、矢量网络分析仪、计算机系统组成。

微波暗室的性能是影响测试精度的重要因素之一,该测量系统所使用的微波暗室经过反射率远场测试系统测试<sup>[2]</sup>,各项性能指标均满足测试要求。喇叭天线为某公司出品的2对标准增益角锥喇叭天线,工作频率分别为4~6 GHz和6~8 GHz。矢量网络分析仪型号为Agilent N5244A PNA-X系列微波网络分析仪,工作频率为10 MHz~43.5 GHz。

### 2 喇叭天线增益实测与理论计算

标准天线的精度直接影响待测天线增益的测量精度,因此确定标准天线的增益是测量待测天线增益的前提和关键。标准增益天线应具备几个特性:(1)天线的增益应是准确已知的;(2)天线的尺寸具有高度稳定性;(3)天线必须具有高极化纯度<sup>[3]</sup>。

#### 2.1 喇叭天线增益实测

一般把测量天线增益的方法分成相对增益测量和绝对增益测量2类,两相同天线法属于绝对增益测量,因此,不仅可以确定待测天线的增益值,也可以确定标准增益天线的增益值。绝对增益测量以弗里斯传输公式为基础。测量原理如下,根据弗里斯功率传输公式<sup>[4,5]</sup>。

$$P_r = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 P_0 G_t G_r \quad (1)$$

式中: $P_r$ 为接收天线的最大接收功率; $P_0$ 为发射天线的输入功率; $G_t$ 为发射天线的增益; $G_r$ 为接收天线的增益; $R$ 为收发天线间的距离; $\lambda$ 为工作波长。

根据dB的定义,对式(1)的两端取以10为底的对数,则(1)

式可表示为:

$$G_t + G_r = 20 \lg \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 10 \lg \left( \frac{P_0}{P_r} \right) \quad (2)$$

此时式(1)里左边各项的单位为dB。为简单起见,在不引起误解的情况下,(2)式左端各项仍采用与(1)式相同的表示方法,下同。

因为接收天线和发射天线完全相同,即 $G_t = G_r = G$ ,则有:

$$G = \frac{1}{2} \left[ 20 \lg \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 10 \lg \left( \frac{P_0}{P_r} \right) \right] \quad (3)$$

在测试过程中存在射频线及同轴连接器的功率损耗 $L$ ,在测试过程中需要计入这部分功率损耗值。于是(3)式应为:

$$G = \frac{1}{2} \left[ 20 \lg \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 10 \lg \left( \frac{P_0}{P_r} \right) + L \right] \quad (4)$$

在正式测量前,先不将天线接入电路,直接将射频线连接在一起,通过矢量网络分析仪扫频测试技术测试出4~8 GHz不同频率点处对应的 $S_{21}$ 值,从而获得不同频率点处射频线及同轴连接器的功率损耗 $L$ 。测量时使用水平校准仪校准,使2只天线间的位置保持正对,先分别测量出2对天线间的距离,其中,4~6 GHz频段和6~8 GHz频段2只天线间的距离 $R$ 分别为2 m和2.14 m,再通过矢量网络分析仪扫频技术测试出不同频段时的 $S_{21}$ 值,将数据进行计算处理即可得到天线的增益值。

为了验证实验的重复性误差,该文重复做了4组实验作为对比,实测增益值如表1、表2所示。

由表1和表2可知,在4~6 GHz频段,不同频点对应的增益不同,增益与频率呈正相关关系,增益值在15.8~18 dB范围内变化;在6~8 GHz频段,增益与频率也呈正相关关系,增益的变化范围为16.4~18.1 dB;在6 GHz频率点处2对天线的增益值分别为17.961~17.965 dB和16.477~16.479 dB,2对不同的天线在相同频率点处增益值不同,但在相同频点处各自增益值的4组测量数据几乎相同,这表明实验的重复性非常好。

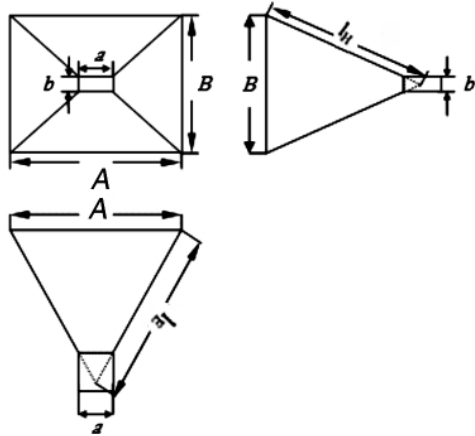


图2 角锥喇叭天线外形尺寸

表3 喇叭天线具体尺寸

	4~6 GHz	6~8 GHz
A/mm	175.5	129.6
B/mm	150.4	110.2
a/mm	47.5	35.2
b/mm	22.1	16.7
$l_E$ /mm	219.0	160.8
$l_H$ /mm	257.0	187.5

### 2.2 喇叭天线增益理论值计算

角锥喇叭天线的理论增益值可以根据工作频率、喇叭尺寸和连接波导的尺寸计算。

图2所示为角锥喇叭天线外形尺寸图。喇叭的口面尺寸A和B、连接波导尺寸a和b、斜高 $l_E$ 、 $l_H$ 如图2所示。该文测试的2个频段的喇叭天线的具体尺寸如表3所示。

任意角锥喇叭天线的增益可以表示成<sup>[3,8]</sup>:

$$G = \frac{8\pi l_E l_H}{AB} \left\{ [C(U) - C(V)]^2 + [S(U) - S(V)]^2 \right\} \times [C^2(\omega) + S^2(\omega)] \quad (5)$$

式中:

$$V = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\sqrt{\lambda} l_H}{A} - \frac{A}{\sqrt{\lambda} l_H} \right) \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\sqrt{\lambda} l_H}{A} + \frac{A}{\sqrt{\lambda} l_H} \right) \quad (7)$$

$$\omega = \frac{B}{\sqrt{2\lambda} l_H} \quad (8)$$

以上式中 $C(\omega)$ 、 $S(\omega)$ 、 $C(U)$ 、 $S(U)$ 、 $C(V)$ 、 $S(V)$ 都是菲涅尔积分。

$$S(x) = \int_0^x \sin \frac{\pi}{2} t^2 dt \quad (9)$$

$$C(x) = \int_0^x \cos \frac{\pi}{2} t^2 dt \quad (10)$$

根据公式计算出2个不同频段的喇叭天线在不同频率点处对应的理论增益值,如表4所示。

### 3 误差分析与修正

理论上要求,测量时2只天线应相距无限远。但是在实际

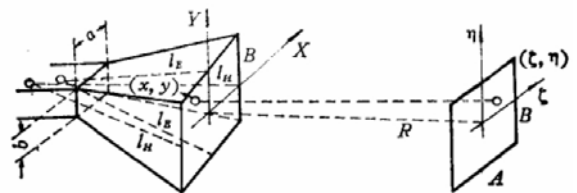


图3 2个喇叭天线之间的坐标关系

表4 喇叭天线理论增益值

频率/GHz	理论值/dB	频率/GHz	理论值/dB
4.0	16.048	6.0	16.746
4.2	16.395	6.2	16.969
4.4	16.719	6.4	17.180
4.6	17.021	6.6	17.384
4.8	17.303	6.8	17.575
5.0	17.566	7.0	17.758
5.2	17.811	7.2	17.931
5.4	18.039	7.4	18.096
5.6	18.252	7.6	18.253
5.8	18.450	7.8	18.400
6.0	18.634	8.0	18.541

测量中,不可能使2只天线相距无限远,只能在有限测试距离上完成。为了与无穷远情况的增益相区别,常常把在有限距离上测得的增益称为视在增益。在满足远场条件的不同有限距离,测量得到的天线增益数据有所区别,距离越远测量所得的数据与天线增益理论计算值越接近。可见为了更加精确地测量得到天线增益值,就必须考虑测量距离带来的影响,对视在增益值进行修正计算<sup>[6,9]</sup>。

如图3所示,发射和接收喇叭天线的孔径间的距离为R,A、B为喇叭的口面尺寸、a、b为连接波导尺寸, $l_E$ 、 $l_H$ 分别为喇叭天线的斜高,(x,y),(zeta,eta)分别为发射天线和接收天线口面场坐标值。

于是,发射喇叭天线孔径电场的分布为:

$$E(x, y) = E_0 \cos \frac{\pi y}{A} \exp \left[ -jk \left( \frac{x^2}{2l_E} + \frac{y^2}{2l_H} \right) \right] \quad (11)$$

接收喇叭天线孔径任意点的场强为:

$$E(\xi, \eta) = \frac{E_0}{2\lambda R} \int_{-A/2}^{+A/2} \left\{ \exp j \left( \frac{\pi y}{A} \right) + \exp \left[ -j \left( \frac{\pi y}{A} \right) \right] \right\} \times \exp \left\{ -j \left( \frac{\pi}{A} \right) \left[ \frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{l_H} + \frac{1}{R} \right) y^2 - \left( \frac{4\eta}{\lambda R} \right) y \right] \right\} dy \times \int_{-B/2}^{+B/2} \exp \left\{ -j \left( \frac{\pi}{2} \right) \left[ \left( \frac{2}{\lambda} \right) \left( \frac{1}{l_E} + \frac{1}{R} \right) x^2 - \left( \frac{4\xi}{\lambda R} \right) x \right] \right\} dx \quad (12)$$

经过一系列的积分运算后,可以得到在距离R处的增益值与距离为∞的远区真实增益值之比是2个函数因子之积,即:

$$\frac{G(R)}{G(\infty)} = Kf(M, P)f(N, Q) \quad (13)$$

式中,K为常数。

$$M = \frac{8\lambda R}{A^2} \quad (14)$$

表5 4~6 GHz天线修正因子

频率/GHz	$\Delta G_E$ /dB	$\Delta G_H$ /dB	$\Delta G$ /dB
4.0	0.10	0.12	0.22
4.2	0.14	0.16	0.30
4.4	0.16	0.18	0.34
4.6	0.17	0.20	0.37
4.8	0.18	0.22	0.40
5.0	0.19	0.23	0.42
5.2	0.21	0.25	0.46
5.4	0.22	0.26	0.48
5.6	0.23	0.27	0.50
5.8	0.24	0.29	0.53
6.0	0.25	0.34	0.59

表6 6~8 GHz天线修正因子

频率/GHz	$\Delta G_E$ /dB	$\Delta G_H$ /dB	$\Delta G$ /dB
6.0	0.10	0.09	0.19
6.2	0.11	0.11	0.22
6.4	0.12	0.12	0.24
6.6	0.14	0.14	0.28
6.8	0.15	0.15	0.30
7.0	0.16	0.16	0.32
7.2	0.17	0.17	0.34
7.4	0.18	0.19	0.37
7.6	0.18	0.21	0.39
7.8	0.19	0.22	0.41
8.0	0.19	0.23	0.42

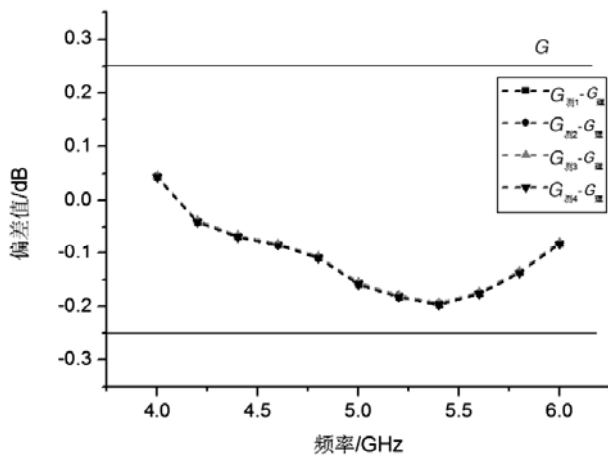


图4 4~6 GHz天线实测增益与理论增益的差值

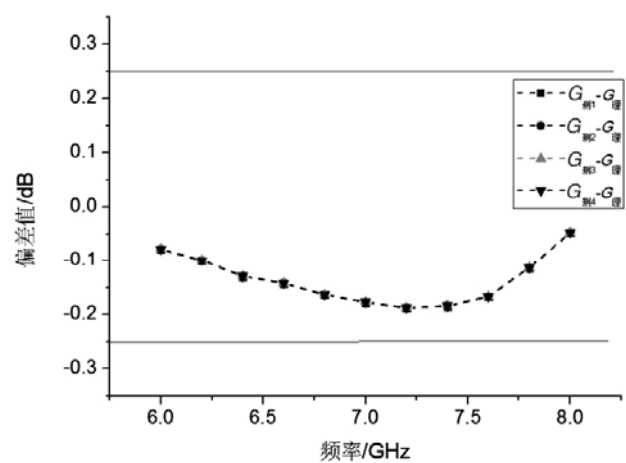


图5 6~8 GHz天线实测增益与理论增益的差值

$$N = \frac{8\lambda R}{B^2} \quad (15)$$

$$P = \frac{8\lambda l_H}{A^2} \quad (16)$$

$$Q = \frac{8\lambda l_E}{B^2} \quad (17)$$

于是,可将 $f(M,P)$ 和 $f(N,Q)$ 分别以dB为单位绘制增益修正曲线<sup>[7]</sup>。

因此,根据已知的喇叭的口面尺寸 $A$ 和 $B$ 、连接波导尺寸 $a$ 和 $b$ 以及上文可以求出斜高 $l_E$ 、 $l_H$ ,再分别求出对应波长处的 $M$ 、 $N$ 、 $P$ 、 $Q$ 值,将与之对应修正曲线上的修正因子求和即是距离增益修正因子。

根据以上公式及增益修正曲线求出的E面修正因子 $\Delta G_E$ 、H面修正因子 $\Delta G_H$ 以及修正因子 $\Delta G$ 如表5和表6所示。

由表4和表5可知,2对天线的修正因子整体上都随着频率增大而增大,仅是变化幅度不同。4~6 GHz频段的天线在0.22~0.59 dB范围内变化;而6~8 GHz频段的天线,变化范围为0.19~0.42 dB。

修正后实测增益与理论计算增益的差值曲线如图4和图5所示。两图中都给出4次实测值与理论值的差别。

由图4和图5可知,2对天线修正后实测增益与理论计算增益的偏差值整体上都随频率呈先增大后减小的

趋势;4~6 GHz频段天线最小偏差值为-0.04 dB,最大偏差值为-0.20 dB;6~8 GHz频段天线最小偏差值为-0.05 dB,最大偏差值为-0.19 dB。根据标准增益喇叭天线的精度要求<sup>[3]</sup>,在2.6 GHz以上频段,增益精度需要达到 $\pm 0.25$  dB以内,由图4和图5可知,4~6 GHz与6~8 GHz频段天线增益的实测值与理论值的最大偏差值分别为-0.20 dB和-0.19 dB,均在 $\pm 0.25$  dB范围内。

#### 4 结论

利用微波暗室、矢量网络分析仪、计算机等设备建立了一套两相同天线法测试天线增益的测量系统,对2对4~6 GHz与6~8 GHz不同频段的天线的增益进行了测试;利用功率传输公式测量出喇叭天线在不同工作频率的实际增益值,并对测量结果进行误差分析,对其做了近距修正;根据喇叭天线的外形尺寸、工作频率以及连接波导尺寸,计算出天线的理论增益值。

实验研究得到的结果如下。

(1)相同天线在不同频点处对应的增益值不同,增益与频率呈正相关关系,2对不同的天线在相同频率点处增益值不同,在4~6 GHz频段,增益的变化范围为15.8~18 dB,在6~8 GHz频段,增益的变化范围为16.4~18.1 dB。

(下转99页)

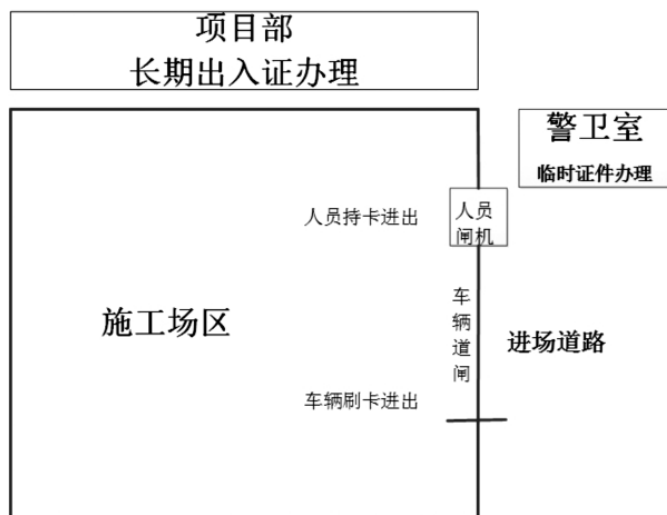


图3 双青500 kV变电站施工现场布置方案图

纸质出入证, 绑定RFID出入证形成常用人员、车辆证件卡, 如果是临时人员直接绑定RFID出入证。

### 3 典型布置方案与应用

因110 kV及以上变电站施工区入口均采取唯一入口, 入口主路宽度约为6 m, 两门柱间宽度略有不同, 以双青500 kV变电站施工现场为例, 典型布置方案如图3所示。

在变电站施工区域入口布置人员闸机一套约1.2 m宽,

布置车辆闸机(抬杆型)一套约4.8 m宽。制证子系统部署在警卫室和项目部。注: 35 kV布置方式可根据现场实际情况参照110 kV以上变电站入口布置方式。

### 4 结语

该方案目前在国网天津电力双青500 kV变电站工程中应用, 实现了与基建管控系统的数据交互, 国网天津市电力公司、建设单位、送变电公司可以随时了解现场人员、车辆、工器具的进出场情况, 掌握同进同出、到岗到位、工程进度等信息, 符合电力基建施工现场人员、车辆、工器具相关管理制度的规定和现场管理的业务需要, 对现场施工人员管理标准化、现场安全管控具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 陈波. 门禁系统在变电站中的应用[J]. 电气时代, 2010(3): 95-97.
- [2] 白浩涵. 物联网技术在区域人员车辆管理系统中的应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [3] 刘海龙. 基建管理信息化建设能力上水平[N]. 国家电网报, 2015-01-22.

(上接95页)

(2) 天线的近距修正因子整体上都随着频率增大而增大, 但是变化幅度不同, 4~6 GHz频段的天线在0.22~0.59 dB范围内变化, 而6~8 GHz频段的天线, 变化范围为0.19~0.42 dB。

(3) 4~6 GHz与6~8 GHz频段天线增益的实测值与理论值的最大偏差值分别为-0.20 dB和-0.19 dB, 均在《天线测量手册》所规定的标准增益喇叭天线的精度要求±0.25 dB范围内。

研究表明, 该文建立基于矢量网络分析仪的标准喇叭天线增益测量系统精度和采用的误差修正方法均满足实际标准喇叭天线的校准要求, 是有效可行的。

### 参考文献

- [1] 黄凯冬. 标准增益喇叭天线的准确定标测量[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(9): 26-29.
- [2] 李晓乐, 刘汝兵, 林麒. 反射率远场测试系统研究[J]. 机电技术, 2015(2): 133-136.
- [3] 毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 180-250.
- [4] 王玖珍, 薛正辉. 天线测量实用手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 13-14.
- [5] 张福顺, 张进民. 天线测量[M]. 西安: 西安电子科技大学出

版社, 2009: 127-128.

- [6] 李福剑, 李彦文. 天线测试中的误差分析[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(1): 116-117.
- [7] 林昌禄. 天线测量[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1987: 91-127.
- [8] 沈国连. 天线测量理论中的基本方程组[J]. 航空电子技术, 2002, 33(2): 41-48.
- [9] 周松林. 天线测试距离对测量结果的影响[J]. 电视技术, 2000(5): 64-66.