

# 天线时域近场测量中的时基及幅度修正技术

王 楠,薛正辉,杨仕明,刘瑞祥

(北京理工大学电子工程系,北京 100081)

**摘 要:** 在天线时域近场测量中由于脉冲信号源的时基抖动和幅度变化所带来的误差是测量中最主要的误差,其中尤以时基误差最为严重,它使得方向图畸变到了无法容忍的程度.本文即针对此问题提出了天线时域近场测量中的时基及幅度修正技术.该技术在测量通道之外增加了一个参考通道,通过检测参考通道信号提取出脉冲信号源的时基及幅度变化,进而以此修正测量通道的信号.大量的实际测量表明该技术稳定可靠.通过对比试验发现,使用该技术的时域近场测量结果的精度达到甚至优于频域近场测量结果的精度.

**关键词:** 天线时域近场测量;时基修正;幅度修正

**中图分类号:** TN821 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 12-2478-07

## Time Base Correction Technique and Amplitude Correction Technique in Antenna Time Domain Near Field Measurement

WANG Nan, XUE Zheng-hui, YANG Shi-ming, LIU Rui-xiang

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In the practice of antenna time domain near field measurement, the biggest errors are introduced by the time base jitter and the amplitude changing of pulse generator. Comparing with the errors caused by amplitude changing, the errors caused by time base jitter are more serious that it can result in unbearable aberrance of measurement pattern. To deal with this problem, the technique of time base correction and amplitude correction is presented in this paper. Besides measuring channel, this technique adds a reference channel in measuring system. Pulse generator's time base jitter and amplitude changing can be obtained from the reference channel, and be adopted to correct measuring channel's signal. The practical measuring results have proved this method's reliability. From comparing experiments, we can find that adopting this technique, the sensitivity of time domain near field measurement is similar to the sensitivity of frequency domain near field measurement, or even better than it.

**Key words:** antenna time domain near field measurement; time base correction; amplitude correction

### 1 引言

天线时域近场测量是一种新兴的天线测量技术,简而言之,就是用—个时域脉冲去激励被测天线,而与时域接收设备相连的探头在采样架的带动下在一个采样面上(一般来说是平面,本文所讨论的亦如此)采集被测天线的时域近场,进而利用所采得的时域近场通过近远场变换算出被测天线的远场,以及再通过口面反演算出被测天线口径场的方法.因为天线时域近场测量的近远场变换和口面反演有纯时域法和时域-频域法两种,所以天线时域近场测量所获得的结果既可以是时域的也可以是频域的.1994年美国Rome实验室的Thorikild B. Hansen和Arthur D. Yaghjian首先提出了不带探头修正的时域平面近远场变换理论<sup>[1,2]</sup>,并于1995年发展了带探头修正的时域平面近远场变换理论<sup>[3]</sup>标志着天线时域近场测量技术的产生.此后人们开始致力于这项技术的工程化研究,并相继有文献报道<sup>[4,5]</sup>.如今这项技术受

到了人们越来越多的关注,其在于运用该技术不仅可以获得传统的频域近场测量所获得的一切信息,而且较之后者还有以下三个明显的优势:

(1) 该技术十分适用于超宽带(UWB)天线的测量.因为时域近场测量可以在一次采样过程中获得被测天线通带内的全部信息,进而可以获得全通带内任意频点的方向图,因此其效率是非常高的,而频域近场的逐点扫描或多点扫描无论是从效率还是从灵活性上根本无法与之相比.

(2) 该技术可以获得被测天线的瞬态场,为研究天线的前期场性能提供了测量技术的保障.由于天线注满时间、网络响应、辐射体索默菲前兆等效应的影晌,天线的前期场实际上是非线性的,这种非线性在时域上表现为信号波形的畸变,并且天线口径越大、网络越复杂畸变越严重<sup>[6]</sup>.对于大威力、高精度雷达来说,正是用大口径天线发射、接收窄脉冲信号,因此其前期场性能如何

收稿日期:2007-06-11;修回日期:2008-09-12

基金项目:国家自然科学基金(No. 60371037);国防预研项目(No. 41307050506)

是一个不能回避的重要问题.在此问题上,时域近场测量技术的纯时域近远场变换和纯时域口面反演正可大显身手,而频域方法则无能为力.

(3) 该技术信号处理手段丰富,可以使实际测量更逼近理论模型,从而提高测量精度.一个典型的例子是:超低副瓣天线测量的难点在于电磁波在探头与被测天线之间的多次反射使得探头修正理论的精度受到限制(探头修正理论是忽略多次反射效应的),而在对被测天线的散射特性一无所知的前提下,建立考虑多次反射效应的探头修正理论是不可能的.而在时域近场测量中,通过适当地选取采样面的位置和激励脉冲的宽度,可以用时间门技术去掉多次反射的影响,从而大大提高测量精度.

此外,时域近场测量技术还可支持为天线建立新的时域考评体系.研究证明天线的辐射性能可以用时域场去衡量,并比传统的频域方向图更直观、更生动、更全面<sup>[6]</sup>.

以上介绍了时域近场技术较之频域近场技术所具有的优势,但同时也应看到时域近场技术较之频域近场技术的不足,这主要是指时域脉冲源输出幅度受限,且高频信噪比较低.时域近场测量需要用极窄的脉冲激励被测天线,而窄脉冲信号发生器很难有大的幅度输出,以一种目前应用在时域近场测量系统中的脉冲源为例,

其脉宽为 130ps,其输出幅度为 10 伏,这几乎是目前世界所能达到的最高水平,然而当测量大口径或有复杂馈电网络的天线时,10 伏的输出仍然不能满足要求.另外分析输出脉冲的频谱可以发现其能量主要集中在低频段,而在高频段能量降低造成信噪比下降,影响测量精度.以此处所提到的脉冲信号源为例,最高可用频段为 X 波段.目前受设备能力的制约,对于更高频段天线的测量还只能采用频域近场方式.

在天线时域近场测量所包含的诸多技术中,时基修正和幅度修正是两个最重要的误差修正技术,是将理论转化为工程实际的关键.其出发点是为了弥补设备能力的不足.其中又以时基修正技术最为关键<sup>[7]</sup>,无它则测量无从获得正确的结果.

## 2 时基误差、幅度误差产生的原因及修正方法

### 2.1 时域近场测量系统的主要设备及误差来源

时域近场测量系统可分为硬件系统和软件系统两部分,其中软件系统采用的算法是解析方法且理论是严格的,因此只要编程正确,由软件系统所带来的误差可忽略不计.时域近场测量系统的误差主要来自硬件系统,是由于设备能力不足造成的,因此首先有必要介绍一下时域近场测量系统的主要设备.

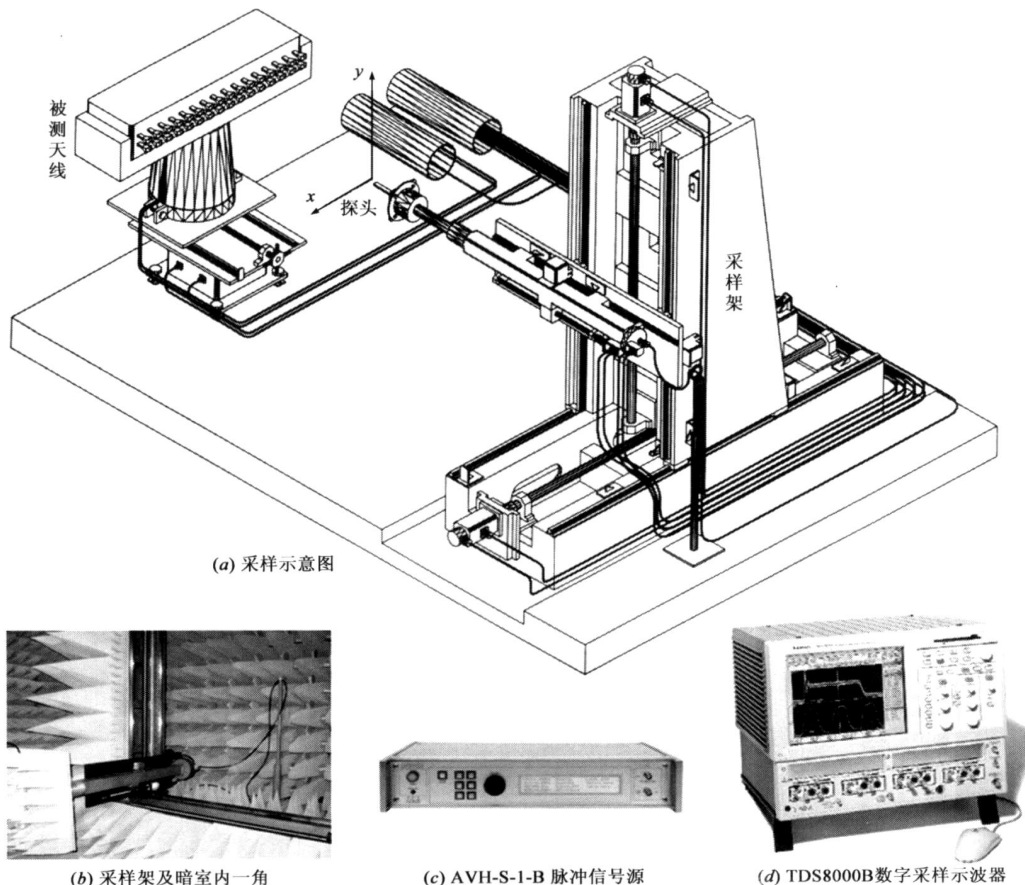


图1 时域近场测量系统的主要设备

图 1 所示为时域近场测量的主要设备,其中包括微波暗室、采样架、脉冲信号源和数字采样示波器。在测量过程中,由脉冲信号源激励被测天线,采样架带动探头在近场采样面上接收信号,经电缆传至采样示波器进行数据采集。在系统刚刚组建的几次验证性实验中,发现测量的方向图与所预期的相比面目全非。在查找原因的过程中首先排除了计算程序出现错误的可能性。在此基础上,采样点的位置精度和采集信号波形的精度决定了测量结果的精度。首先,微波暗室按照标准建造,满足测量要求。采样架的运动精度为 0.01mm,误差也在允许范围之内。采样示波器在幅度上为 14 位 A/D 采样,时间精度为飞秒级也满足测量的要求。脉冲信号源输出脉冲宽度 < 130ps,幅度 10V,脉冲信号源的触发信号和输出脉冲信号之间的时延是用延迟线来实现的,在实际使用过程中,延迟线会因温度的变化而产生形变,从而改变延迟距离,影响延迟时间;此外,触发方波信号的波形在实际使用过程中的细微变化也会对脉冲信号的触发时间产生影响,并且这种影响较之延迟线的形变更为严重。脉冲信号源标称的时基抖动为 15ps,经研究发现 15ps 的时基抖动正是造成测量误差的主要原因<sup>[8]</sup>。并且在实际测量过程中还发现,脉冲信号源所输出的信号幅度也有大约前后 10% 的变化。因此脉冲信号源的时基抖动和幅度变化是系统的主要误差来源。

## 2.2 时基误差、幅度误差的修正方法

将脉冲信号源的信号输出端通过电缆经过衰减器直接连接到采样示波器的信号输入端,用采样示波器监测脉冲信号源的输出波形。经过多次试验后发现,脉冲信号源的时基抖动和幅度变化是不规则的,其间并无规律可循,因此不能用靠经验函数修正测量结果的方法。因此,在测量系统中增加参考通道,实时地监测脉冲信号源输出信号的变化,并以此来修正采样信号成为时基修正和幅度修正所必需采用的方法。

在时域近场测量中,脉冲信号源所输出的射频能量是十分宝贵的,因此总是希望其能量全部用来激励被测天线。基于这一点,最初所考虑的增加参考通道的方案就像远场测量一样增加一个参考天线,但通过试验发现,在近场测量中这种方法并不能行得通。原因是:为了不影响探头采样,参考天线必须放置在采样区域之外,而被测天线在采样区域之外的辐射场是非常微弱的(这也是近场测量所必需满足的条件),致使参考天线放在此处不能形成一个有足够信噪比的信号通

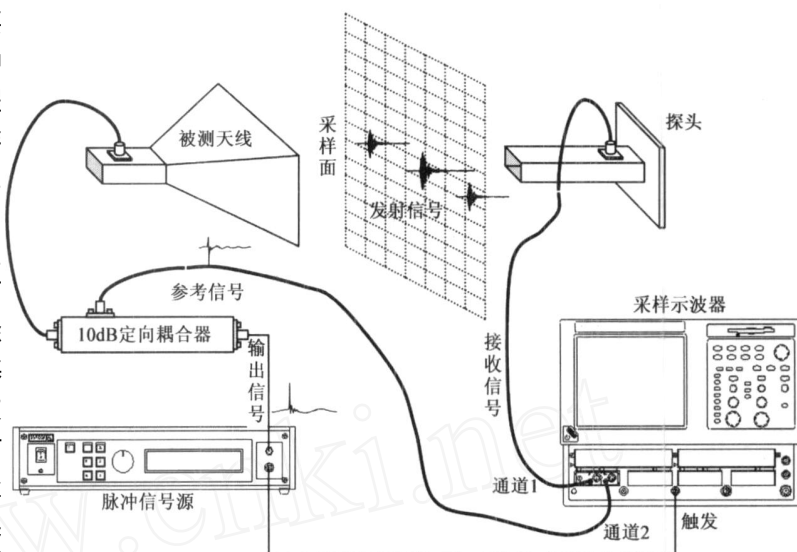


图2 时基修正系统连接示意图

道。因此,要想建立参考通道就必须从脉冲信号源的输出端分出一部分能量。

图 2 即为时基修正系统连接示意图。如图所示,脉冲信号源的输出信号经过一个 10dB 定向耦合器被分成两路,从定向耦合器主路输出的信号作为发射信号给被测天线馈电,由被测天线辐射后被探头在采样面上接收,进入采样示波器的通道 1,此构成测量通道;从定向耦合器支路输出的信号作为参考信号经由电缆直接进入采样示波器的通道 2,此构成参考通道。当探头运动到某一采样点位置时,由工控计算机向采样示波器发送指令,同时采集通道 1 和通道 2 的信号。这样当探头在每一个采样点采样时,脉冲信号源输出信号的变化情况实时地被通道 2 所记录,通过适当的信号处理方式将脉冲信号源的时基抖动和幅度变化提取出来就可以修正通道 1 的采样信号。

修正通道 1 采样信号的过程其实就是一个近场重建的过程。由于时域近场测量的数据处理(包括近远场变换和口面反演)有时域-频域方法和纯时域方法两种方式,因此其所对应的近场重建也有频域近场重建和时域近场重建两种方式。以下将以近远场变换为背景,对两种近场重建方法进行讨论。

### 2.2.1 时域-频域方法的近场重建

所谓时域-频域方法的近远场变换就是在所关心的频点上运用傅立叶变换将时域近场转化为频域近场,再运用频域近远场变换算出远场方向图的方法。

$$\dot{E}(r_0) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} E(r_0, t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

式(1)即为时域近场到频域近场的傅立叶变换式,其中:  $E(r_0, t)$  是  $r_0$  点的时域近场,  $\dot{E}(r_0)$  是频率为  $f$  的频域近场,它是一个复数。经傅立叶变换后时域近场的

时基和幅度误差就转化为频域近场的相位和幅度误差。

$$\hat{F}(\hat{r}, \phi) = \frac{j k}{2} \hat{r} \times \int \int \hat{z} \times \hat{E}(\mathbf{r}_0) e^{-j k \hat{r} \cdot \mathbf{r}_0} d x_0 d y_0 \quad (2)$$

式(2)为频域近远场变换式,其中  $\hat{F}(\hat{r}, \phi)$  为  $(\hat{r}, \phi)$  方向的频域远场,  $k = 2\pi f/c$  为波数,  $c$  为光速,  $\hat{r}$  为  $(\hat{r}, \phi)$  方向的单位矢量,  $\hat{z}$  为采样面的外法矢。从式(2)可以看出频域近场重建就是对所采集的频域近场进行幅相修正以得到正确的  $\hat{E}(\mathbf{r}_0)$ 。

设  $E(\mathbf{r}_0, t)$  是所采集的有幅度和时基误差的时域近场,  $\hat{E}(\mathbf{r}_0)$  是  $E(\mathbf{r}_0, t)$  经式(1)傅立叶变换后所得到的有幅相误差的频域近场,它与没有幅相误差的频域近场  $\hat{E}(\mathbf{r}_0)$  的关系可表示为:

$$\hat{E}(\mathbf{r}_0) = a \hat{E}(\mathbf{r}_0) e^{j\phi} \quad (3)$$

其中:  $a$  为幅度因子,  $\phi$  为相位误差。  $a$  和  $\phi$  的具体数值可由参考通道获得。

在参考通道中,设时域参考信号为  $S_i(t)$ , 下标  $i$  表示与坐标为  $\mathbf{r}_0$  的第  $i$  个采样点同时的参考信号。将  $S_i(t)$  用与式(1)同样的方法进行傅里叶变换有:

$$\hat{S}_i = \frac{1}{2} \int S_i(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

由于我们所关心的只是近场的相对幅相,所以在具体的修正过程中只要以  $\hat{S}_i$  对  $\hat{E}(\mathbf{r}_0)$  进行归一化即可,即令:

$$a = \left| \frac{\hat{S}_i}{\hat{E}(\mathbf{r}_0)} \right| \quad (5)$$

$$\phi = \arg\left(\frac{\hat{S}_i}{\hat{E}(\mathbf{r}_0)}\right) \quad (6)$$

将其带入式(3)最终得到:

$$\hat{E}(\mathbf{r}_0) = \frac{1}{\left| \hat{S}_i \right|} \hat{E}(\mathbf{r}_0) e^{-j \arg[\hat{S}_i]} \quad (7)$$

此即时域-频域方法的近场重建过程,实验证明这种方法的修正效果十分理想。

### 2.2.2 纯时域方法的近场重建

所谓纯时域方法的近远场变换就是由时域近场运用纯时域近远场变换直接算出时域远场的方法。纯时域近远场变换的公式为:

$$F(\hat{r}, \phi, t) = \frac{1}{2} \hat{r} \times \int \int \hat{z} \times \frac{\partial}{\partial t} E(\mathbf{r}_0, t + \hat{r} \cdot \mathbf{r}_0/c) d x_0 d y_0 \quad (8)$$

其中:  $F(\hat{r}, \phi, t)$  为  $(\hat{r}, \phi)$  方向的时域远场,  $c$  为光速。

$E(\mathbf{r}_0, t)$  是所采集的有幅度和时基误差的时域近场,它与没有幅度和时基误差的时域近场  $E(\mathbf{r}_0, t)$  的关系可表示为:

$$E(\mathbf{r}_0, t) = a E(\mathbf{r}_0, t + \tau) \quad (9)$$

其中:  $a$  为幅度因子,  $\tau$  为时基误差。与时域-频域方法同样的,  $a$  和  $\tau$  的具体数值可由参考通道获得。

实际采下的时域信号没有明确的波头和波尾可

言,只有波形的波峰是一个可以由程序判别的特征点。但是实验证明由峰值跟踪的办法所获得的  $a$  和  $\tau$  起不到任何修正的效果,原因是系统噪声所致。既然时域-频域方法的近场重建起到了很好的修正效果,所以可以在选则一个适当的参考频率的前提下,用式(4)将时域参考信号变换到频域,然后用式(5)所获得的幅度因子  $a$  进行纯时域近场的幅度修正,而通过式(6)所获得的相位抖动  $\phi$  可算出相应的时基抖动  $\tau$ ,从而进行纯时域近场的时基修正。这种方法实际上起到了降噪的效果。在傅里叶变换中  $\phi$  和  $\tau$  有如下关系:

$$\tau = \phi / 2\pi f_0 \quad (10)$$

其中:  $f_0$  为参考频率。而最终所得到的修正过的时域近场为:

$$E(\mathbf{r}_0, t) = \frac{E(\mathbf{r}_0, t - \tau)}{a} \quad (11)$$

这里有两点需要说明,一个是参考频率  $f_0$  的选取,另一个是如何处理计算  $\tau$  时所出现的数值突变现象。

首先讨论如何选取适当的参考频率。以式(6)求  $\phi$  就是对  $\hat{S}_i$  的虚部、实部的比求反正切的过程,所得到的  $\phi \in [0, 2\pi]$ , 因此由式(10)求出的  $\tau \in [0, T_0]$  ( $T_0 = 1/f_0$  为参考频率的周期)。当测量过程中的时基偏移量大于  $T_0$  时,  $\phi$  和实际的时基偏移量之间没有一一对应的关系,由这种方法得出的  $\phi$  有  $2\pi$  整数倍的误差,相应的  $\tau$  将会有  $T_0$  的整数倍的误差。从式(2)看到,对于时域-频域方法来说,  $\phi$  有  $2\pi$  整数倍的误差是无所谓的,并不影响结果,可以不予理睬。而根据式(8),对于纯时域方法来说,任何时延上的误差都会造成结果的误差,是不能接受的。因此选择适当的参考频率就是让测量过程中的最大时基偏移量小于  $T_0$ , 以保证  $\phi$  和实际的时基偏移量之间有一一对应的关系。测量过程中的最大时基偏移量可以通过峰值跟踪的方法做出估计,一般地,在测量通带的范围内  $f_0$  应取得小些。

此外,在用上述方法求解  $\tau$  的过程中,还会出现数值突变现象。造成这种现象的原因是,在复平面上,矢量  $\hat{S}_i$  围绕实轴正半轴做小范围的上下跳动,从而使得复角  $\phi$  由接近 0 突变到接近  $2\pi$ , 再经过式(10)的对应关系,则  $\tau$  由接近 0 突变到接近  $T_0$  (在选择了适当的参考频率的基础上,  $\tau$  的突变量仅仅是  $T_0$ ) 由前面的分析知道,在纯时域方法中这种时基突变时不能接受的,必须进行处理以消除之。因为相邻的两个采样点的时基抖动不会有大的突变,因此可用下面的办法进行间断点处理:

Begin

求采样点  $r_n$  的时基误差  $t_n$

if ( $t_n - t_{n-1} > T_0$ ) then  $t_n = t_n - T_0$

if ( $t_n - t_{n-1} < -T_0$ ) then  $t_n = t_n + T_0$

End

其中： $\alpha$  是一个控制因子，一般取一个略小于 1 的正数。实验证明，以这种办法进行的修正有很好的效果。

### 3 时基修正和幅度修正技术的实验结果

为了验证时基修正和幅度修正技术的有效性，我们对多个波段的标准增益喇叭进行了测量，将经过修正的测量结果同未经修正的测量结果以及频域近场测量结果和理论值进行对比，用实验结果检验这种技术的有效性。由于篇幅的限制，在此仅列出 S 波段标准增益喇叭的测量结果。

#### 3.1 S 波段标准增益喇叭的测量方案

S 波段标准增益喇叭的小端尺寸为 72.14mm × 34.04mm，大端尺寸为 400mm × 320mm，采样面尺寸为 1000mm × 1000mm，采样间隔为  $d_x = d_y = 25\text{mm}$ ，采样面距被测天线口径面距离为 320mm。被测天线的中心频率为 3.3GHz，以此频点的结果同频域近场测量结果和理论值进行对比。采样探头为矩形开口波导探头，探头的宽边尺寸为 80mm，窄边尺寸为 40mm。近场重建采用时域频域方法，采用带探头修正的近远场变换数据处理方式。

#### 3.2 测量结果

图 3 到图 5 为测量过程中所用到的修正数据，包括时基漂移、幅度漂移和相位漂移。图 6 即为对 S 波段标准增益喇叭近场采样数据进行时基修正前后的近场相位分布对比图。图 6 (a) 为对原始测量通道的采样数据在 3.3GHz 频点上进行傅里叶变换而得到的频域近场的相位分布；图 6 (b) 为对参考通道的采样数据在 3.3GHz 频点上进行傅里叶变换，得到该频点的相位抖动数据，然后以此数据去修正图 6 (a) 的频域近场的相位分布而得到的新的结果。

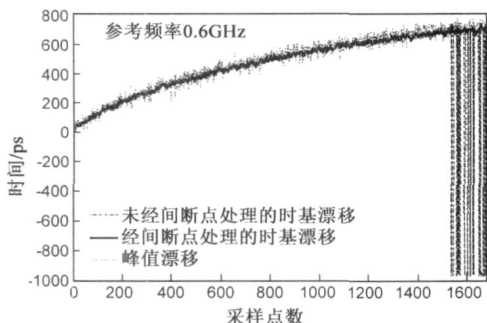


图3 测量过程中的时基漂移

图 7 和图 8 为测量得到的被测天线两个主面的方向图，图中包含了各种方法所得结果的对比，其中频域近场方向图为 NSI 频域近场测量系统的测量结果。图 9 为三维远场方向图的对比结果。

此外时域近场测量技术优于频域近场测量技术突

出的一点就是一次采样可获得被测天线全频带的频域信息。同样是基于这一次的采样数据我们还可以获得中心频点之外的其它频点的远场方向图，图 10 到图 12 即为经过时基修正和幅度修正后的其它频点的测量结果。

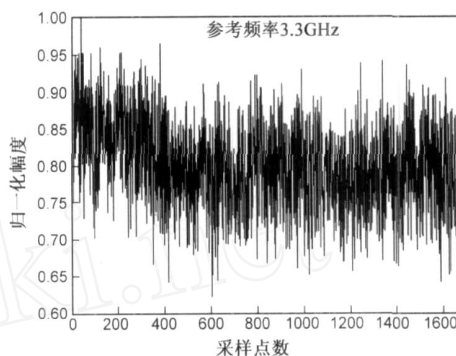


图4 测量过程中的幅度漂移

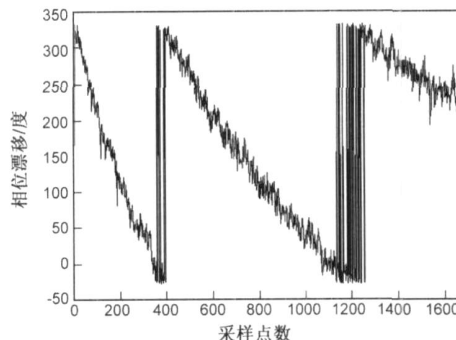


图5 3.3GHz频率上的相位漂移

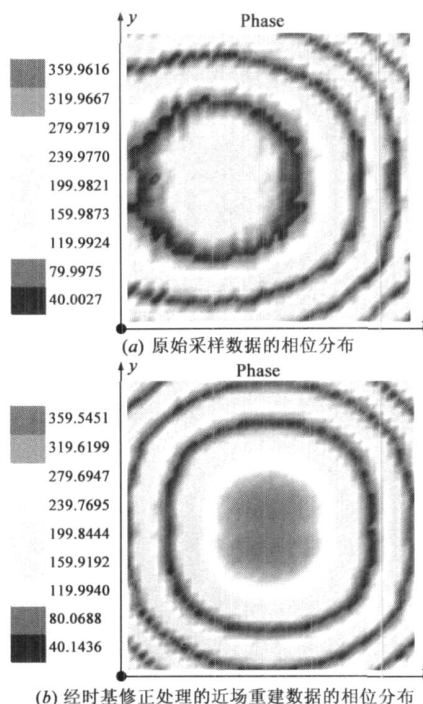


图6 被测天线的采样近场在3.3GHz频点上的相位分布图

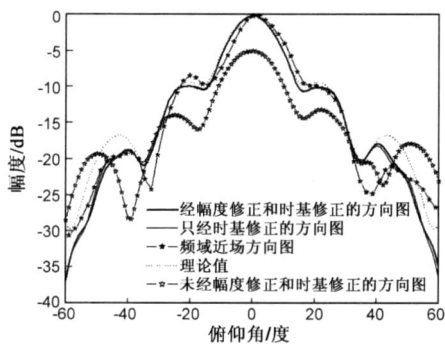


图7 3.3GHz被测天线E面测量结果

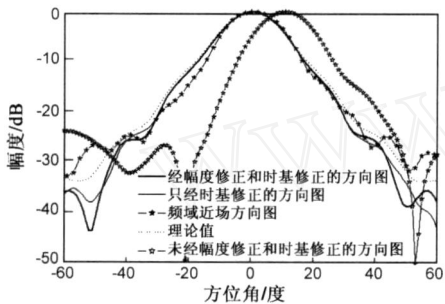
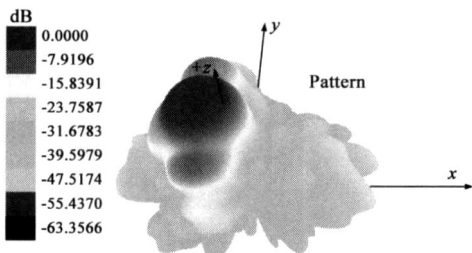
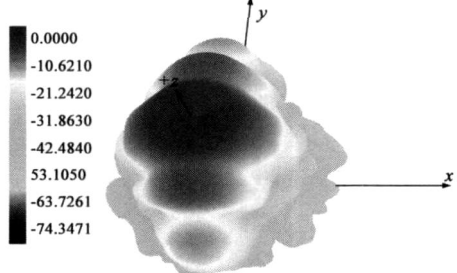


图8 3.3GHz被测天线H面测量结果



(a) 由不经时基修正的近场得到的远场方向图



(b) 由经时基修正的近场得到的远场方向图

图9 3.3GHz被测天线三维远场方向图测量结果

### 3.3 结果分析

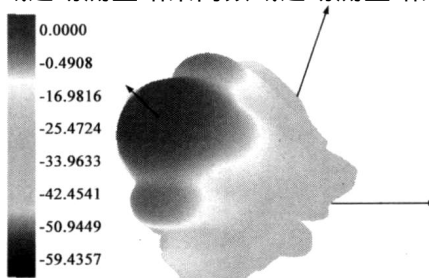
从图3的时基漂移数据可以看到,用峰值跟踪法获得的时基漂移曲线有明显的噪声干扰,但仍能看出其整体变化趋势:在整个的采样过程中,脉冲信号源约有700ps的时基漂移,而瞬时的时基抖动约为50ps到100ps.实验发现,如果采用此曲线进行时基修正,所得结果面目全非.采用2.2.2节所介绍的方法进行时基修正,参考频率选为0.6GHz(其周期为1.67ns,大于700ps的最大时基偏移量),所获得的时基漂移曲线噪声干扰明显降低,瞬时时基抖动约为15ps到20ps,与厂家标称

的指标相符,但是曲线的末端有明显的震荡,采用间断点处理技术后,震荡现象消失.实验证明,以此曲线进行时基修正结果非常良好.

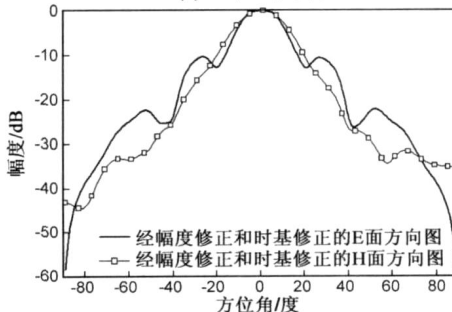
图4和图5为采用2.2.1节方法所获得的幅度漂移曲线和相位漂移曲线.由于最终进行对比实验的是被测天线的方向图,所以数据处理采用的是时域-频域方法,因此近场重建中实际用到的是图4、图5两条曲线.其实在时域-频域方法中,图5和图3两条曲线是等价的,而纯时域方法只能用图3的曲线进行修正.在图5的相位漂移曲线中出现了360度突变的现象,这并不影响实际的修正效果.

从图6中我们可以清楚地看到,图6(a)原始数据的相位分布有明显的偏移,并且相位中心区域的边界有明显的毛刺,测量中扫描方式采用的是水平(x轴)等待、垂直(y轴)步近的方式,结合图5的相位抖动数据,我们不难对这种相位偏移的成因做出判断.而图6(b)经过时基修正后的相位分布则非常均匀,完全符合我们对一个标准增益喇叭口径近场相位分布的预期,这证明时频域结合法的时基修正是非常有效的.

图7和图8分别为3.3GHz频点上被测天线的E面方向图和H面方向图,从图中可以看出未经时基和幅度修正的方向图严重变形,而经过时基修正后的方向图十分接近理论值和频域近场测量的结果,再加上幅度修正后结果有进一步的改善.从图中还可以看出,经过时基修正和幅度修正的方向图与只经过时基修正的方向图十分接近,这说明时基误差是时域近场测量误差的主要来源,而测量结果对幅度误差并不敏感.此外,将时域近场测量结果同频域近场测量结果进行对



(a) 三维远场方向图



(b) 主平面远场方向图

图10 被测天线在2.7GHz频点上的测量结果

比可以看出,时域近场测量结果更接近理论值,这说明时域近场测量的精度不逊于频域近场测量的精度。

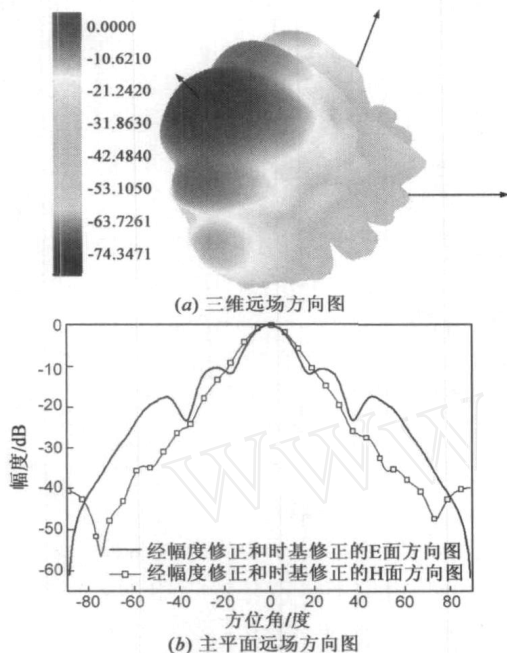


图11 被测天线在3GHz频点上的测量结果

从图9中我们可以明显看到,由不经时基修正的近场得到的远场方向图,主瓣有明显偏移,波形有明显畸变;而由经时基修正的近场得到的远场方向图则非常规则,并与理论值吻合地很好.从图10到图12中我们可以看到时基修正技术可以在被测天线的全通带内取得良好的效果,当然所用的修正数据都是基于各自频点的相移。

#### 4 结论

天线的时域近场测量是一种新兴的天线测量技术,这种技术能够高效、全面、真实地反映被测天线的辐射性能.从本质上说频域空间是一个数学上的中间过程,真正的频域空间并不存在,真实世界总是在一定的时空范围内存在的.从这个意义上说,时域天线测量技术能更好地反映事物的真实.从实验结果看,这种技术不仅切实可行,而且其测量精度不逊于频域近场技术.时域近场技术发展前景广阔,在这种技术的基础上,大量的时域信号分析技术可以同天线测量技术相结合,这对双方的发展都有良好的促进作用。

#### 参考文献:

- [1] Thorkild B Hansen, Arthur D Yaghjian. Planar near-field scanning in the time domain, Part 1: formulation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(9): 1280 - 1291.
- [2] Thorkild B Hansen, Arthur D Yaghjian. Planar near-field scanning in the time domain, Part 2: sampling theorems and compu-

tation schemes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(9): 1292 - 1300.

- [3] Thorkild B Hansen, Arthur D Yaghjian. Formulation of probe-corrected planar near-field scanning in the time domain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(6): 569 - 584.
- [4] De Jough R V, Hajian M, Lighthart L P. Antenna time domain measurement techniques[J]. Antennas and Propagation Magazine IEEE, 1997, 39(5): 7 - 11.
- [5] Wang Nan, Xue Zheng-hui, Yang Shing-ming, Gao Bei-qing, Xu Xiao-wen. Antenna time domain planar near field measurement system[J]. International Journal on Wireless and Optical Communications, 2006, 3(2): 1 - 7.
- [6] 王楠,薛正辉,杨仕明,刘瑞祥.超宽带超低副瓣相控阵天线时域远场辐射特性研究[J].电子学报,2006,34(9): 1605 - 1609.  
Wang Nan, Xue Zheng-hui, Yang Shi-ming, Liu Rui-xiang. The characters of time domain radiated field of ultra wide band ultra low side lobe phased array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1605 - 1609. (in Chinese)
- [7] Wang Nan, Xue Zheng-hui, Yang Shi-ming, Liu Rui-xiang, Xu Xiao-wen. Time base correction technique in antenna time domain planar near field measurement[A]. 2007 5th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings[C]. Beijing: Chinese Institute of Electronics Press, 2007. 106 - 109.
- [8] 陈国华. 天线平面时域近场测试误差仿真分析研究[D]. 北京:北京理工大学,2004. 45 - 51.

#### 作者简介:



王楠男,1973年出生于天津市.北京理工大学电子工程系博士研究生,1996年毕业于西安电子科技大学,获工学学士学位,2005年毕业于北京理工大学,获工学硕士学位.现主要从事相控阵天线及天线时域近场测量的研究.

E-mail: wang121612@sina.com



薛正辉男,1970年出生于上海,现为北京理工大学电子工程系副教授,中国电子学会高级会员,中国电子学会微波分会委员.1992年毕业于北京理工大学电子工程系,1995年和2002年在校电磁场与微波技术专业获工学硕士学位和工学博士学位.自1995年留校任教至今,主要从事电磁场与微波技术方面的教学和计算电磁学、微波毫米波天线及其测试技术、电磁兼容及微波毫米波技术方面的有关研究,发表论文30余篇.

E-mail: zhxue@bit.edu.cn