

基于超宽带技术的相控阵天线单元移相量测试

邱程, 付红卫, 王欣, 向正义

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 针对不便于拆卸和分解的相控阵天线单元,设计了一种基于超宽带技术的相控阵天线单元移相量测试方法。将ps级的超宽带信号耦合馈电到天线单元上,通过采样接收输出信号来测试天线单元移相状态,利用时间窗技术对接收信号进行处理,使测试误差减少了一个量级。搭建了超宽带时域测试系统,对相控阵天线单元移相量进行了测试,测试误差在 $\pm 0.5^\circ$,证明了该方法的有效性。

关键词 超宽带;相控阵天线;移相量;时域测量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.011

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0042-04

A Method of Testing the Phase-shifting Steps of Phased-array Antenna Element Based on Ultra-wideband Technologies

QIU Cheng, FU Hong-wei, WANG Xin, XIANG Zheng-yi

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A method, based on ultra-wideband technologies, is designed to quickly measure the phase-shifting steps of phased-array antenna element which is inconvenient to demount. By coupling and feeding UWB signals in picoseconds to antenna elements, phase-shifting steps of antenna element can be tested according to sampling echo signals. The use of data processing algorithms, such as window function method, greatly improves the accuracy of the test. A time domain measurement system of UWB used for testing phase-shifting steps of some phased-array antenna element is set up. The simulation is good in agreement with practice, and demonstrates the feasibility of the method in engineering practice.

Key words: UWB; phased-array antenna; phase-shifting steps; time domain measurement

相控阵天线单元的测试方法可以分为频域法和时域法。频域法^[1-2]的应用最为广泛,其通过连续步进的方法,在多个频点测出天线单元散射参数。但由于频点与频点之间存在间隔,如果在扫频间隔之内存在频率特性的突变,则信息就会丢失,带来测量误差,如果要求提高精度,增加扫频点数,则带来速度变慢的问题。时域法虽没有频域法运用广泛,却是一种比较有特色的方法,近几年许多学者也提出

了很多基于时域法的天线测量技术^[3-5]。这种基于超宽带技术的时域法由于超宽带脉冲的瞬时带宽宽,固有的距离分辨率高^[6],反映了真实的瞬态响应,而且时域测量的测量速度快,数据处理方便,可以直观地得到测试结果,因而在天线测量方面拥有非常突出的优点。进行相控阵天线单元检测时,天线单元的移相量测试是最基本的测试项目,特别是很多天线单元不便于拆卸和分解,采用耦合馈电的

收稿日期:2013-03-18

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8007)

作者简介:邱程(1989—),男,山东高密人,硕士生,主要从事超宽带技术及应用研究。

E-mail: qiucheng1989@126.com

方式利用时域法对其进行检测就更加便捷和快速。

本文设计了一种利用超宽带技术对相控阵天线单元移相量进行时域测量的方法,并且基于该方法搭建了超宽带时域测试系统,对相控阵雷达的8位码数字移相单元进行了实际测试。

1 测试原理

测试系统的信号模型见图1,图中测试系统发射天线发出的信号为 $s(t)$,天线单元接收端接收到的信号 $y_1(t)$ 包含了直接耦合到天线单元的信号和受环境影响后进入天线单元的信号。

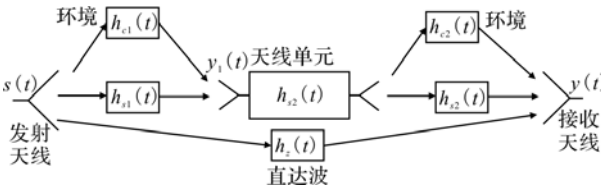


图1 测试系统信号模型

Fig. 1 Signal model of the measurement system

当发射信号直接耦合到天线单元输入端时,信号的响应为 $h_{s1}(t)$,受环境影响进入天线单元输入端信号的响应为 $h_{e1}(t)$,则:

$$y_1(t) = s(t) * [h_{e1}(t) + h_{s1}(t)] \quad (1)$$

式中*为卷积。同样,经过天线单元移相后进入测试系统接收天线的信号也存在上述分量,直接耦合信号和受环境影响信号的响应分别为 $h_{s2}(t)$ 和 $h_{e2}(t)$ 。天线单元移相器造成的信号响应为 $h_z(t)$ 。因此,测试系统接收信号 $y(t)$ 和发射信号 $s(t)$ 的关系,在时域可以表示为:

$$y(t) = s(t) * [h_{e1}(t) + h_{s1}(t)] * h_z(t) * [h_{e2}(t) + h_{s2}(t)] + s(t) * h_z(t) + n(t) = s(t) * h_1(t) * h_z(t) * h_2(t) + s(t) * h_z(t) + n(t) \quad (2)$$

式中: $h_1(t) = h_{e1}(t) + h_{s1}(t)$; $h_2(t) = h_{e2}(t) + h_{s2}(t)$; $n(t)$ 为噪声信号。

用 $Y(\omega)$ 、 $S(\omega)$ 、 $H_1(\omega)$ 、 $H_z(\omega)$ 、 $H_2(\omega)$ 、 $H_z(\omega)$ 、 $N(\omega)$ 分别表示 $y(t)$ 、 $s(t)$ 、 $h_1(t)$ 、 $h_z(t)$ 、 $h_2(t)$ 、 $h_z(t)$ 、 $n(t)$ 的傅里叶变换,则上式在频域系统可表示为:

$$Y(\omega) = S(\omega) H_1(\omega) H_z(\omega) H_2(\omega) + S(\omega) H_z(\omega) + N(\omega) \quad (3)$$

在不同的移相状态下,天线单元移相器造成的信号响应为 $h_z(t)$,测试系统接收到的信号 $y(t)$ 为:

$$y(t) = s(t) * h_1(t) * h_z(t) * h_2(t) + s(t) * h_z(t) + n(t) \quad (4)$$

同样在频域可表示为:

$$Y(\omega) = S(\omega) H_1(\omega) H_z(\omega) H_2(\omega) + S(\omega) H_z(\omega) + N(\omega) \quad (5)$$

信号在频域下的响应^[7],还可表示为:

$$H_z(\omega) = |H_z(\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (6)$$

因此,有:

$$\frac{H_z(\omega)}{H_z(\omega')} = \frac{|H_z(\omega)|}{|H_z(\omega')|} e^{j\phi(\omega - \omega')} \quad (7)$$

在大部分情况下,可以认为 $|H_z(\omega)| \approx |H_z(\omega')|$,即:

$$\frac{H_z(\omega)}{H_z(\omega')} \approx e^{j\phi(\omega - \omega')} \quad (8)$$

从式(8)中可直接提取移相量 $\Delta\omega = \omega - \omega'$ 。

为计算天线单元移相量,可以认为:

$$Y(\omega) \approx \frac{H_z(\omega)}{H_z(\omega')} Y(\omega') \quad (9)$$

由上述分析,可得以下结论:

1) 可以通过式(8)~式(9)直接提取天线单元的移相量信息,但这种方法带来的问题是计算精度不高,特别是当直达波分量 $H_z(\omega)$ 和噪声分量 $N(\omega)$ 较大时,带来的误差较大。

2) 要提高测试精度,必须尽量增加信号直接耦合进天线单元的分量,减少直达波分量。

3) 要提高测试精度,还可以采取一定的数据处理方法对接收到的信号进行处理,减少直达波分量和噪声分量的影响。

由于杂波分量和移相信号到达测试系统接收天线会存在时间上的差异,因此可以在时域上采用加窗函数的方法对接收到的信号进行处理,将提前或滞后于有用信号到达时间的其它杂波分量滤除,提高测试精度。加窗虽然使移相信号时域波形发生了变化,但却较好的保留了移相信号的频率相位信息。

2 测试系统组成

根据上述测试原理,搭建了超宽带时域测试系统,测试系统主要由计算机、时域测试设备、信号产生设备、适配器和电源组成。

测试系统的工作是在软件的控制下进行的,按照测试流程,测试软件的子模块控制计算机将相应的控制信息通过总线传输到时域测试设备和信号产生设备,产生超宽带激励信号以及控制码、移相码等数字信号,加至被测天线单元。同时,信号产生设备要为时域测试设备提供时钟,将全系统同步起来。天线单元的输出信号由时域测试设备接收,数字化后通过总线送回计算机,计算机对其进行采集、处理

和分析,综合判断被测天线单元的性能和指标。

2.1 时域测试设备

时域测试设备是整个测试系统的核心设备,其功能是发射超宽带信号,接收天线单元的输出信号,采集并变换为数据输出到计算机,组成框图见图2。

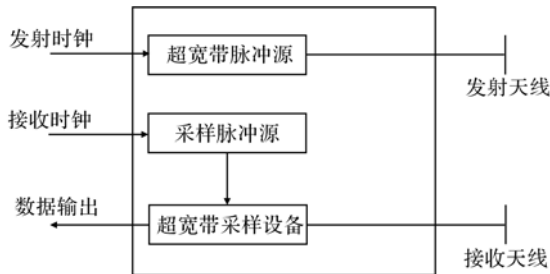


图2 时域测试设备组成框图

Fig. 2 Block diagram of time domain test equipment

在本测试系统中使用的超宽带脉冲源能够产生上升时间为50 ps,下降时间为60 ps,宽度为100 ps的高斯形脉冲信号,10 dB带宽为:DC~7.5 GHz,覆盖了天线单元工作的频率范围。其时域波形见图3。超宽带采样设备的核心是超宽带采样器^[8],采样门的3 dB带宽约为8 GHz。

2.2 信号产生设备

信号产生设备不仅需要为时域测试设备提供时钟(模拟信号),同步全系统工作,为被测天线单元提供控制码和相位码(数字信号),而且还需要实时可控,生成全系统自动测试的时序。由于其时钟精度决定了整个测试系统的测试精度,因此其性能必须非常稳定。

2.3 适配器

由分析测试原理得到的结论,要提高测试精度,必须尽量增加信号直接耦合进天线单元的分量,减少直达波分量。根据这一原则,设计了测试系统适配器,见图3。

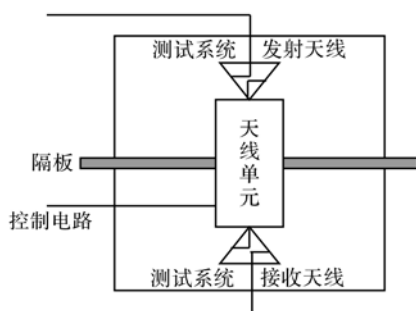


图3 测试系统适配器示意图

Fig. 3 The adapter of the measurement system

测试系统发射天线和接收天线与被测天线单元的辐射器之间,采用耦合馈电方式,这样绝大部分测试发射信号将耦合到被测单元上,并从接收天线端

耦合出来。而且待测天线2端被隔板隔开,减少了直达波信号分量,大大提高了信噪比。

3 测试分析

为了验证该测试系统的有效性,对相控阵天线的单个天线单元进行了测试。假定该天线单元是8位码数字移相单元,即具有 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ 8种相移状态。在天线单元 90° 移相状态时,测得的时域波形见图4,相位分析结果见图5,由图5可以看出在中心频率附近相位测试误差为 $\pm 20^\circ$ 。

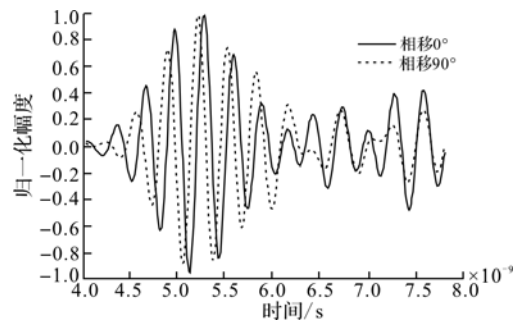


图4 90° 相移时时域波形

Fig. 4 The waveform of 90° phase shift

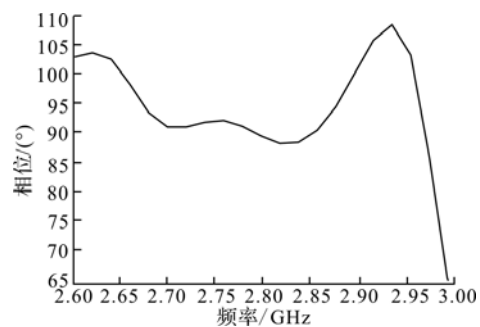


图5 90° 相移时相位分析结果

Fig. 5 The analysis results of 90° phase shift

从时域波形中可以发现,测试系统接收天线接收的信号有很明显的拖尾,这部分信号除整个测试系统噪声信号之外,其它主要是由直达波信号分量造成的。为了减少环境因素对测试系统测试精度的影响,采用了加窗技术对接收到的信号进行数据处理,测得的时域波形见图6,相位分析结果见图7。从图7中可以看出,同样在移相 90° 的状态,采用加窗技术后测试误差缩减到 $\pm 0.5^\circ$,大大提高了测试精度。

设置信号产生设备生成控制码时序,使相控阵天线单元按顺序进行移相,示波器打开余辉保持功能,对输出信号进行测试,显示的8个移相状态波形见图8。这也就实现了测试系统对相控阵天线单元

的自动移相控制,可以大大提高测试速度。

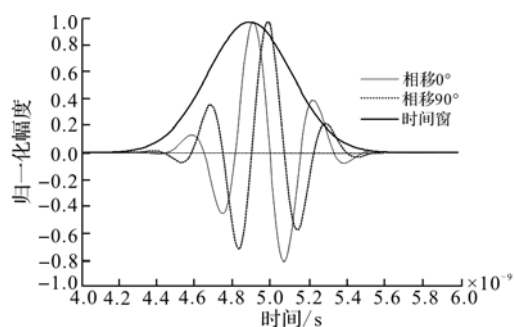


图6 90°相移时,采用时间窗技术后时域波形

Fig. 6 The waveform of 90° phase shift with time window

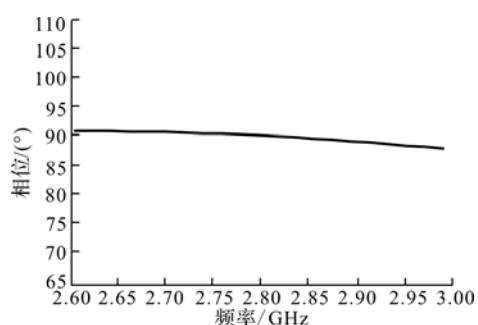


图7 90°相移时,采用高斯时间窗技术后相位分析结果

Fig. 7 The analysis results of 90° phase shift with time window

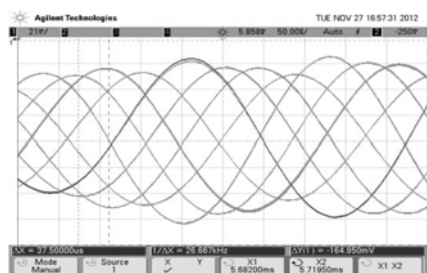


图8 自动测试时,8个移相状态波形(0°~315°)

Fig. 8 The waveforms of 8 phase shift(0°~315°)

4 结语

本文设计了一种针对相控阵天线单元移相量测试方法,采用了先进的基于超宽带理论的时域测量技术,通过计算机实现对单元移相码和控制码的自动控制,实现了天线单元的自动快速测试。系统中还采用了时间窗技术等数据处理算法,将测试环境的影响大大减小,在一般测试环境要求下,极大地提高了测试精度,将测试误差减少了一个量级。基于该方法搭建了超宽带时域测量系统,对某型相控阵天线单元移相量进行了测试,实验证明了该方法的

有效性,可以较好的应用于工程实际中。

参考文献 (References):

- [1] Patton W T. Near-field alignment of phased-array antennas [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1999, 47(3): 584-591.
- [2] Nobuyasu T, Masataka O, Yoru Y. Phased array calibration method with evaluating shifter error[C]//Antenna measurement techniques association. Denver, Colorado, USA:[s. n.],2001:259-263.
- [3] Hansen T B. Planar near-field scanning in the time domain, part 1: formulation [J]. IEEE trans antennas propagate, 1994, 42 (9):1280-1291.
- [4] 薛正辉. “时间窗”对天线时域平面近场测试结果的影响[J]. 电波科学学报,2007,22(1):158-165.
XUE Zhenghui. Effect of time-gate in antenna planar near-field measurement in time domain [J]. Chinese journal of radio science, 2007, 22 (1): 158-165. (in Chinese)
- [5] SHEN Xianjun, CHEN Xu. Time domain planar near-field measurement simulation [C]//Antenna measurement techniques association 2006. Austin, Texas, USA:[s. n.],2006:458-462.
- [6] 费元春. 超宽带雷达理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
FEI Yuanchun. Ultra wideband radar theory and technology [M]. Beijing: National defense industry press, 2010. (in Chinese)
- [7] 吴大正. 信号与线性系统分析 [M]. 北京:高等教育出版社,2005.
WU Dazheng. Analysis of signals and linear systems [M]. Beijing: Higher education press,2005. (in Chinese)
- [8] 王欣,童创明,付红卫. 超宽带采样头的设计及其在时域测量中的应用[J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):120-123.
WANG Xin, TONG Chuangming, FU Hongwei. Design of the UWB sampler and its application in time domain measurement[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2010,31(8):120-123. (in Chinese)

(编辑:田新华)