

文章编号:1001-893X(2011)06-0012-05

新型 X 频段六端口测速测距雷达的设计与仿真^{*}

方新田¹, 童创明^{1,2}, 刘磊³, 吴利楠¹

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 毫米波国家重点实验室, 南京 210096;
3. 空军实验训练基地 三区司令部教研室, 甘肃 山丹 734100)

摘 要:介绍了六端口测速测距基本原理, 设计了 X 频段的微带六端口结, 采用 ADS 软件搭建六端口测速测距雷达系统, 结合六端口结的测量数据进行仿真, 结果表明该雷达系统具有较高的测量精度和工作性能, 具有重要的研究价值。

关键词:六端口技术; 六端口结; 测速测距雷达; 系统仿真

中图分类号:TN713; TN015 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2011.06.003

Design and Simulation of a Novel X-band Six-Port Range/Velocity Measurement Radar

FANG Xin-tian¹, TONG Chuang-ming^{1,2}, LIU Lei³, WU Li-nan¹

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China;

2. State Key Lab of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China;

3. The Three Staff Department, Air Force Training and Experiment Base, Shandan 734100, China)

Abstract: The basic principle of six-port technique for range/velocity measurement is introduced, and X-band micro-strip six-port junction is designed. By adopting ADS software and the six-port measurement data, the six-port range/velocity measurement radar system is established and simulated. The results show that the radar system has high measurement accuracy and good performance, which indicates the novel radar has important research value.

Key words: six-port technology; six-port junction; range/velocity measurement radar; system simulation

1 引 言

六端口测量技术因其能够精确测量反射系数幅度和相位, 自 1977 年被提出以来得到了迅速发展和广泛应用^[1,2]。在保持宽频带、高精度、自动化的前提下, 六端口技术直接采用任意的微波网络, 用幅度测量代替相位测量, 测量过程简单, 并可以采用合适的校准程序来弥补硬件的非理想性, 极大地降低了自动网络分析仪的成本和对微波元器件加工精度的

要求^[3]。利用六端口测量技术的特性可以将其应用于雷达接收机^[4-6]。微波六端口网络可以通过直接解调射频信号得到中频信号, 使 AD 器件只需工作在基带频率, 节省了混频器, 减少了电路复杂性, 从而使整个前端电路除了本振外, 完全是由无源器件构成, 体积小便于集成, 易于宽带工作。文献[7]表明, 工作频率为 2 GHz、35 GHz、94 GHz 的基于六端口技术的防撞雷达已经得到实现, 它们的共同特点是体积小、成本低, 且距离和相对速度的测量精度较高。

本文利用仿真软件 Ansoft HFSS 实现了中心工

^{*} 收稿日期: 2011-01-30; 修回日期: 2011-04-20

基金项目: 毫米波国家重点实验室基金资助项目(K200907)

Foundation Item: The Foundation of the State Key Laboratory of Millimeter Waves(K200907)

作频率为10 GHz的六端口结及六端口测速测距雷达关键器件的仿真设计,且利用器件测量结果实现了六端口测速测距雷达的系统仿真,结果表明该雷达系统具有较高的测量精度和工作性能。

2 六端口雷达设计与仿真

2.1 基本原理

六端口测量技术是根据矢量分析原理,采用幅度测量代替相位测量来测量复反射系数的幅度和相位。图 1 所示为由 4 个 90°定向耦合器和两个 45°相移组成的六端口结。每个端口 ($i = 1 \sim 4$) 的输出功率 P_i 可以表示为

$$P_i = |S_{5i} \cdot a_5 \exp(j\theta_5) + S_{6i} \cdot a_6 \exp(j\theta_6)|^2 \tag{1}$$

式中, $a_5 = |a_5| \exp(j\theta_5)$ 、 $a_6 = |a_6| \exp(j\theta_6)$ 分别为本振输入信号和射频输入信号, S_{5i} 和 S_{6i} 是六端口结的本振以及射频输入端口与 4 个输出端口之间的传输系数。

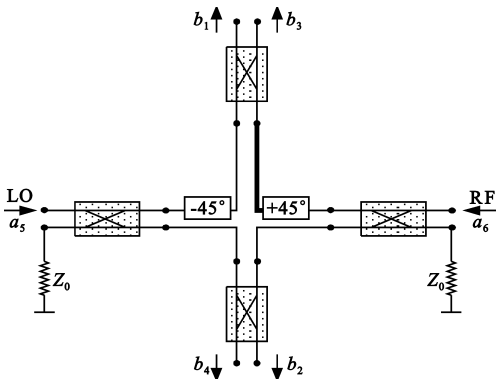


图 1 六端口结结构示意图
Fig.1 Illustration of the six-port junction

当两个输入信号幅度相等时,令 $|a_5| = |a_6| = a$,根据六端口结的理论,则 P_i 可表示为

$$P_i = K |a|^2 \left| \exp \left[j \left(\frac{\pi}{4} + \theta_6 - \theta_5 \right) \right] - q_i \right|^2 \tag{2}$$

式中, K 是比值常量, q_i 是六端口结的 q 点。

$$q_i = \exp \left\{ j \left[\frac{\pi}{4} + (i - 1) \frac{\pi}{2} \right] \right\} \tag{3}$$

六端口结的 q 点则为等式 $P_i = 0$ 在复平面内的解。

为进行功率测量,功率计会接到六端口结的输出端。理想功率计的直流输出电压与六端口结的输出信号幅度的二次幂呈线性关系。令六端口各输出端

口信号为 $b_i (i = 1 \sim 4)$,则功率计直流输出电压 V_i 为

$$V_i = K |b_i|^2, \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{4}$$

结合式(2)可进一步得到:

$$V_i = K |a|^2 \left| \sin \left(\frac{\Delta\theta}{2} - (i - 1) \frac{\pi}{4} \right) \right|^2 \tag{5}$$

式中, $\Delta\theta = \theta_6 - \theta_5$ 为射频输入信号和本振输入信号相位差,输出电压的周期均为 2π 且与相互间相位相差 $\pi/2$ 的整数倍。图 2 为两输入信号不同相位差时对应的归一化直流输出电压。令反射系数矢量为 Γ ,则可由测得的 4 个功率计输出信号表示为

$$\Gamma = (V_3 - V_1) + j(V_4 - V_2) = K |a|^2 \exp(j\Delta\theta) \tag{6}$$

反射信号的幅度和相位即可由式(6)得到。 Γ 矢量的幅度对应于反射信号的幅度,而相位则对应于两射频信号的相位差。

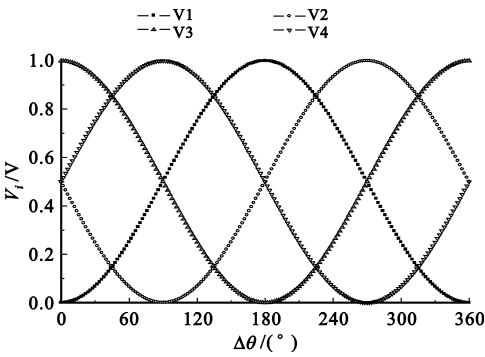


图 2 归一化六端口结 4 个输出电压波形
Fig.2 Normalized output DC voltages of the six-port junction

2.2 六端口雷达测量原理

当发射信号和接收信号作为六端口两输入信号,目标的速度可由多普勒频率决定:

$$v = \frac{c}{2f} f_D \tag{7}$$

式中, f_D 为多普勒频率, c 为光速, f 为发射信号的频率。其中:

$$f_D = \frac{\text{phase}(\Gamma)}{2\pi\Delta t} \tag{8}$$

反射系数 Γ 矢量会随着多普勒频率 f_D 在复平面内旋转,目标相对运动方向可由 Γ 矢量在复平面内的旋转方向得到。

距离测量则需要使用频率为 f_1 和 f_2 的两个连续波。目标的距离 d 可以通过两反射系数 Γ_1 和 Γ_2 的相位差得到:

$$d = \frac{c(\text{phase}(\Gamma_1) - \text{phase}(\Gamma_2))}{4\pi(f_1 - f_2)} \tag{9}$$

最大的测量精度范围则对应最大的反射系数相位差为 2π 。

2.3 X 频段六端口结

该六端口结采用微带结构,介质板相对介电常数为 2.2,厚度0.5 mm,其实物图如图 3 所示。

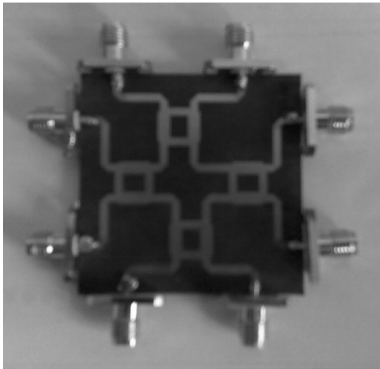
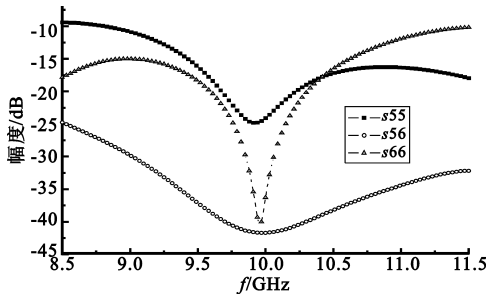


图 3 六端口结实物图
Fig.3 Configuration of six - port junction

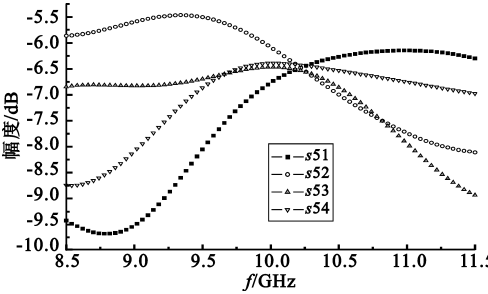
根据测速测距雷达的工作原理,六端口结应工作在较窄的带宽,如图 4(a)所示,在 9.5 ~ 10.5 GHz 的带宽范围内,本振与射频输入端口的反射损耗以及之间的隔离都低于 -15 dB,符合系统要求。图 4(b)和图 4(c)为本振输入端口的 S 参数和 4 个输出端口的相位关系。图 4(d)和图 4(e)为射频输入端口的 S 参数以及 4 个输出端口的相位关系。根据公式(1),4 个输出端口的功率是两个输入端口和 4 个输出端口之间 S 参数的函数,而它们的幅度理论值为 -6 dB。图 4(b)和图 4(d)为六端口结两个输入端口和 4 个输出端口之间 S 参数的实测幅度值,其值在10 GHz时都处于 -6.5 dB左右,且在工作带宽内其幅度值的变化范围都是可以接受的。图 4(c)和图 4(e)为六端口结两个输入端口和 4 个输出端口之间 S 参数的实测相位值,由图可知各个输出端口之间相位关系也符合六端口结的设计要求。

2.4 X 频段六端口测速测距雷达

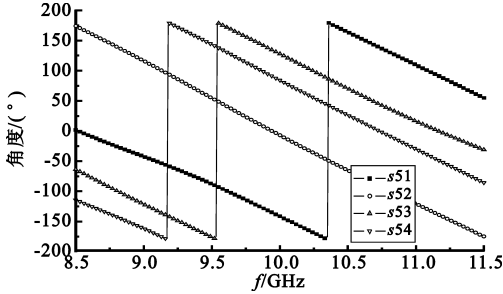
图 5 给出了六端口测速测距雷达的结构示意图,以六端口的测量数据为基础,进行 ADS 系统仿真,系统添加以下元器件参数:增益为8 dBi的发射和接收天线,15 dB耦合器,15 dB衰减器,10 dB低噪声放大器以及10 dBm的压控振荡器。仿真时,目标反射信号多普勒频率设为1 kHz。



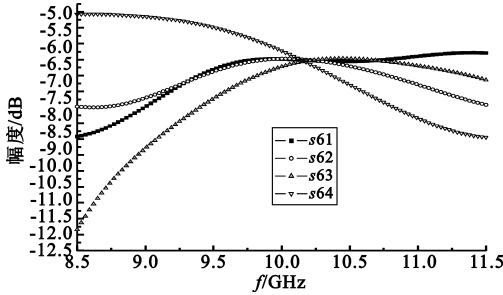
(a)本振和射频端口反射和隔离实测幅度值



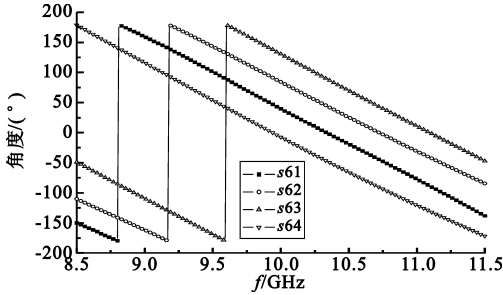
(b)本振输入端口 S 参数的实测幅度值



(c)本振输入端口 S 参数的实测相位值



(d)射频输入端口 S 参数的实测幅度值



(e)射频输入端口 S 参数的实测相位值

图 4 六端口结测量结果
Fig.4 Measurement result of six - port junction

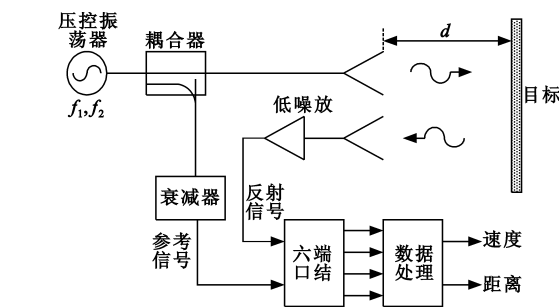


图 5 六端口雷达结构图
Fig.5 Block diagram of the six - port radar

图 6 为系统仿真中得到的六端口结(检波管之前)一个输出端口的输出信号,其周期为 1 ms,多普勒频率为 1 kHz,与反射信号的多普勒频率 1 kHz 相一致。由此可见六端口系统在测量多普勒频率方面误差很小。目标的相对速度 v 可通过式(7),由测量得到的多普勒频率计算得到,当 $f_D = 1\text{ kHz}$ 、 $f = 10\text{ GHz}$ 时,目标的相对速度为 15 m/s 。

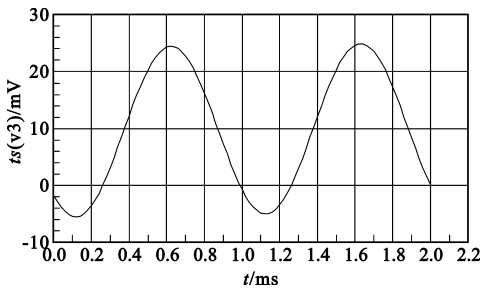


图 6 六端口雷达仿真电压输出波形($f_D = 1\text{ kHz}$)
Fig.6 Simulated waveform of an six - port radar output signal($f_D = 1\text{ kHz}$)

为得到目标的距离,系统仿真使用两个不同频率的连续波交替发射,并测量各自对应的相位差,通过公式(9)计算得到目标距离。例如两个连续波的频率差为 $\Delta f = 2\text{ MHz}$ 时,精确测量范围为 75 m 。

图 7 为使用六端口结测量的 S 参数进行系统仿真,目标距离 25 m 时得到的六端口雷达 4 个输出端口的对应电压输出波形。与图 2 进行对比,电压输出波形有相同的趋势,但是电压输出波形的幅度的最大值并不一致,这应该是由六端口结设计与加工的非理想性使得六端口结的传输 S 参数与理论值有一定的偏差造成的。

系统仿真时频率差为 2 MHz ,目标距离为 25 m ,通过处理得到的反射信号相位结果如图 8 所示。对应于距离的变化,反射信号相位具有一定的非线性变化,但仍符合距离测量精度的要求。

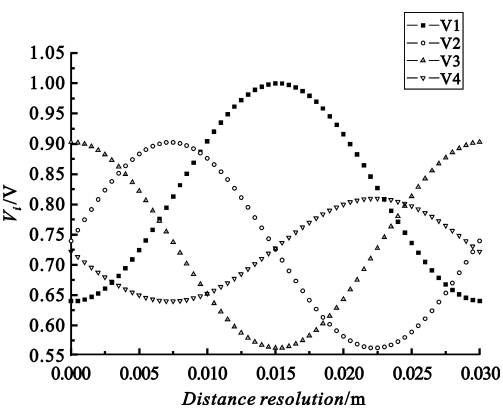


图 7 六端口雷达仿真归一化电压输出波形
Fig.7 Normalized simulation output voltages versus the distance resolution

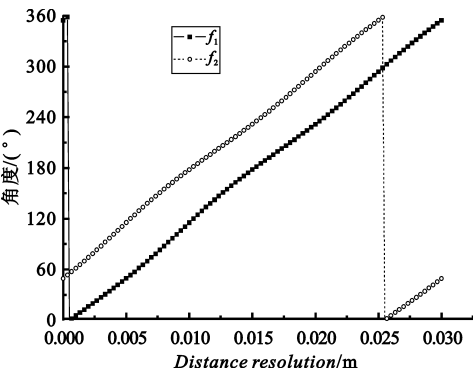


图 8 两个连续波相位信号
Fig.8 Phase signal versus the distance resolution for two CW signals

3 总 结

本文设计了微带结构的六端口结,并利用其测量数据进行了六端口测速测距雷达的系统仿真。仿真结果表明,六端口雷达在距离和相对速度的测量方面有着相当高的精确度。六端口测量技术因其通过功率电压等标量参数的测量而精确得到复反射系数的相位和幅度的特性,因此得到了广泛应用。不仅如此,六端口电路还具有体积小、成本低、易于集成、多频段工作等优点,这些优势必将给六端口测速测距雷达注入强大的活力。由此可见,六端口雷达作为一种新型的测速测距雷达,有着非常良好的发展前景。

参考文献:

[1] 吴利楠,张旭春,童创明,等.六端口技术的发展与应用[J].电讯技术,2010,50(5):108 - 113.
WU Li-nan,ZHANG Xu-chun,TONG Chuang-ming,et al. De-

- velopment and Application of Six-Port Technology[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(5): 108 – 113. (in Chinese)
- [2] 方新田, 张旭春, 童创明, 等. 六端口技术在波达方向估计中的应用[J]. 电讯技术, 2010, 50(10): 124 – 128.
FANG Xin-tian, ZHANG Xu-chun, TONG Chuang-ming, et al. Application of Six-Port Technology in Direction Finding – of – Arrival Estimation[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(10): 124 – 128. (in Chinese)
- [3] Jae-du Yu, Kyung-sig Ban, Choo-yeon, et al. Various Six-Port Correlators Using Coupler and Power Divider[C]// Proceedings of the 2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking. Hainan: IEEE, 2008: 445 – 448.
- [4] 杨健, 刘发林. 六端口技术在雷达中的应用[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(2): 71 – 76.
YANG Jian, LIU Fa-lin. A New Radar Based on Six-Port Technology[J]. Radar Science and Technology, 2005, 3(2): 71 – 76. (in Chinese)
- [5] Xiao Fengchao, F M Ghannouchi, T Yakabe. Application of a Six-Port Wave – Correlator for a Very Low Velocity Measurement Using the Doppler Effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(2): 297 – 301.
- [6] LI Chao-jiang, ZHANG Han-qiao, WANG Ping-shan. A Novel Six-Port Circuit Based on Four Quadrature Hybrids[J]. International Journal of RF and Microwave Computer – Aided Engineering, 2009, 20(1): 128 – 132.
- [7] Emilia Moldovan, Serioja – Ovidiu Tatu, Tamara Gaman. A New 94 – GHz Six-Port Collision – Avoidance Radar Sensor[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech-

niques, 2004, 52(3): 751 – 759.

作者简介:

方新田(1984—), 男, 安徽芜湖人, 2009 年于空军工程大学获硕士学位, 现为工程师, 主要研究方向为微波电路及器件设计等;

FANG Xin-tian was born in Wuhu, Anhui Province, in 1984. He received the M.S. degree from Air Force Engineering University in 2009. He is now an engineer. His research interests include microwave and millimeter – wave circuits, etc.

Email: fangxintian@126.com

童创明(1964—), 男, 湖北黄冈人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、电磁场数值计算、微波毫米波电路等;

TONG Chuang-ming was born in Huanggang, Hubei Province, in 1964. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include radar system, computation in electromagnetics, microwave and millimeter – wave circuits, etc.

刘 磊(1984—), 男, 新疆昌吉人, 空军实验训练基地三区司令部教研室讲师, 主要从事装备教学工作;

LIU Lei was born in Changji, Xinjiang Uygur Autonomous Region, in 1984. He is now a lecturer in the Three Staff Department of Air Force Training and Experiment Base.

吴利楠(1986—), 男, 安徽阜阳人, 2009 年于空军工程大学获硕士学位, 现为工程师, 主要研究方向为微波电路及器件设计等。

WU Li-nan was born in Fuyang, Anhui Province, in 1986. He received the M.S. degree from Air Force Engineering University in 2009. He is now an engineer. His research interests include microwave and millimeter – wave circuits, etc.

欢迎订阅全国中文核心期刊《电讯技术》

邮发代号: 62 – 39

全国各地邮局均可订阅!