

文章编号: 2095-4980(2013)02-0174-05

基于 Simulink 的太赫兹雷达系统仿真

杨 琪, 邓 彬, 王宏强, 秦玉亮, 丁文霞

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 系统仿真对于太赫兹雷达试验系统的优化设计具有重要意义。为对即将搭建的某多频段复用太赫兹雷达系统进行验证, 本文以 335 GHz 为例对该系统进行了方案设计和分析, 带宽 21.6 GHz, 然后基于 Matlab/Simulink 设计了倍频、混频、正交解调等模块从而构建起太赫兹雷达 Simulink 系统, 并以 3 个点目标为例进行了仿真, 得到了雷达信号在各个阶段的频谱图, 获得了 3 个点目标的距离像, 距离像位置和分辨率与理论值一致。最后对结果误差和存在问题进行了分析。

关键词: Simulink 仿真; 太赫兹; 雷达系统; 仿真

中图分类号: TN955⁺.1; TP391.9

文献标识码: A

Simulation of a THz radar system based on Simulink

YANG Qi, DENG Bin, WANG Hong-qiang, QIN Yu-liang, DING Wen-xia

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: System simulation is important to the optimal design of terahertz radar experiment systems. In order to validate a multiband terahertz radar system, this paper presents a conceptual design and analysis of a 335 GHz terahertz radar system. Then the modules of mixing, frequency multiplication, and quadrature demodulation are designed based on Matlab/Simulink, which form a terahertz radar system. Thereafter a simulation is performed with three point targets as examples, and the spectra of radar signals in each stage are obtained as well as the range profile of the point targets. The range profile and resolution are consistent with the theoretical values. A brief analysis on error and problems occurring in the simulation is given.

Key words: Simulink; Terahertz; radar system; simulation

太赫兹(Terahertz, THz)波通常指频率在 0.1 THz~10 THz(对应波长 30 μm ~3 mm)之间的电磁波, 其频率介于毫米波与红外光之间, 处于宏观电子学向微观光子学的过渡频段。太赫兹波频率较高, 由于产生和检测手段的限制, 人们对该波段的了解一直非常有限, 使得太赫兹成为电磁波谱中最后一个未被全面研究和利用的频率窗口, 被称为“太赫兹空隙”。近年来, 随着太赫兹源、检测和相关器件的突破, 太赫兹波一系列优越性能得以发现, 同时显示出巨大的潜在应用前景^[1-3], 太赫兹雷达就是其中一项重要的应用。由于太赫兹频段波长远小于微波、毫米波, 太赫兹雷达更易于实现大信号带宽和窄天线波束, 也有利于对目标进行高分辨率成像。同时, 在太赫兹频段物体运动引起的多普勒效应更为显著, 也有利于目标运动甚至微动特征的检测识别。因此, 太赫兹雷达系统近年来引起了普遍关注^[4-7], 目前以实验系统为主, 主要用于目标雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)测量和成像。国内中国工程物理研究院、上海 802 所、中科院电子所、首都师范大学、电子科技大学、北京理工大学等采用购买或自研方式建设了太赫兹雷达试验系统。国防科技大学也计划搭建五频段结构复用太赫兹雷达试验系统。由于太赫兹频段器件和集成技术尚不成熟, 在太赫兹雷达系统研制或搭建过程中, 系统级仿真能够提前测试和验证系统方案的合理性和正确性, 便于器件选型、误差预判和风险控制, 具有十分重要的意义。目前, 雷达系统仿真软件主要有美国 NI 公司推出的 LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)^[8]、Agilent 公司的 ADS(Advanced Design System)^[9], 以及 Mathworks 公司的 Simulink^[10]等, 也可以利用多种软件进行混合仿真^[10-12]。其中 Simulink 提供了丰富的信号处理模块和部分射频模块, 提供了方便的图形输出界面, 并且操作

收稿日期: 2012-12-10; 修回日期: 2012-12-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61171133); 青年科学基金资助项目(61101182); 湖南省自然科学基金杰出青年科学基金资助项目(11JJ1010)

方便,成本较低,易于复用,因此本文选择 Simulink 作为太赫兹雷达仿真工具。

1 太赫兹雷达系统简介

一种典型的太赫兹雷达系统的原理图如图 1 所示,这也是美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)采用的方案。一个 25 GHz 和一个 24.8 GHz 的本振信号分别与任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)输出的调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)进行混频,经过高通滤波得到和频信号,然后两路分别进行 12 倍频,其中一路作为发射信号,从天线 TX 发射出去;另外一路作为解调参考信号,用来将从接收机 RX 接收到的高频信号解调到低频段。这种方式类似于脉冲线性调频信号的去斜处理,可以降低采样带宽(由 GHz 到 MHz 量级),但由于目前作用距离较短,解调参考信号一路无需延迟,因此混频解调后得到的信号表现为由多个谐波组成的窄带信号,每个谐波对应一个散射点,窄带信号的中心频率位于 2.4 GHz 再加一个距离延迟导致的频率。同时,为了在相对较低的频段继续进行正交解调,2 个本振也进行混频,并对得到的 200 MHz 差频信号进行 12 倍频,得到一个 2.4 GHz 的参考信号。最终,该信号与刚才经过解调的回波信号进行 I/Q 正交解调,得到 I,Q 两路信号,中心频率近似为 0(实际上位于距离延迟导致的频率处)。

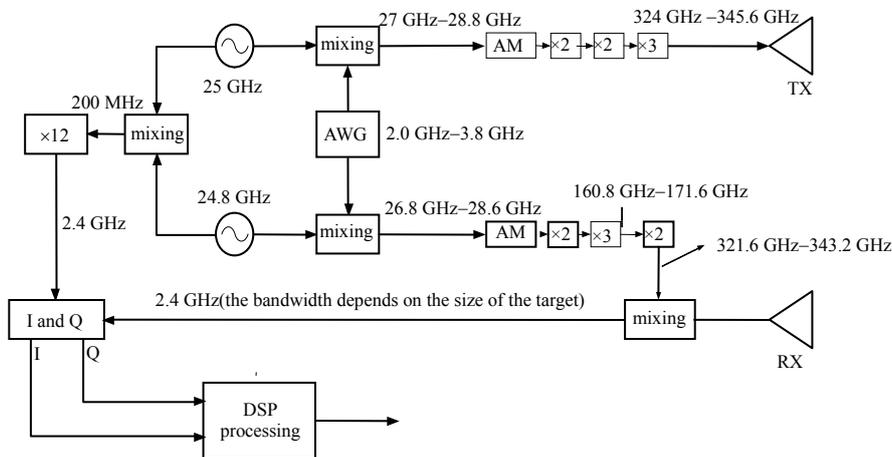


Fig.1 Schematic diagram of THz radar system

图 1 THz 雷达系统原理图

注意上述方案只是一种选择,还可采用多级混频方式。接收端混频时也可采用子谐波混频器,在理解上可以认为将图中 $\times 2$ 倍频器与混频器封装在一起。此外混频前还可加一个低噪声放大器。这都取决于频段选择、器件水平和实际需要,图 1 只是一个原理框图。

2 太赫兹雷达系统 Simulink 模块设计

按照上述原理框图,开发了太赫兹雷达 Simulink 仿真系统。Simulink 是基于时间流的仿真工具,多用于通信、控制等领域,在仿真雷达时需要注意采样时间设置要满足奈奎斯特采样定理(不是带通采样定理),当雷达仿真涉及射频时往往导致效率下降。本文在仿真时一方面控制射频最高频率,另一方面控制信号持续时间以避免速度过慢。

2.1 AWG 模块

不失一般性,本文采用一个中心频率 2.9 GHz、带宽 1.8 GHz、脉宽 $1 \mu\text{s}$ 的线性调频信号生成器代替原理图中的 AWG,仿真时间取一个脉宽时长,因此可视为 FMCW 信号的一部分。在 Simulink 中有现成的线性调频信号模块“chirp”。线性调频信号的数学表达式为:

$$f(t) = A \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{1}{2} K t^2\right) \quad (1)$$

式中: A 为幅度; $\text{rect}(t/\tau)$ 为一个宽度为 τ 的矩形窗; f_0 为初始频率; K 为调频率。

2.2 混频模块

根据积化和差三角公式,2 个频率分别为 f_1 和 f_2 的余弦信号的乘积,相当于 2 个频率分别为 $f_1 - f_2$ 和 $f_1 + f_2$ 的信号之和。数学表达式为:

$$\cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f_1 + f_2)t) + \cos(2\pi(f_1 - f_2)t)] \quad (2)$$

因此,2 个信号相乘后,可以通过滤波得到希望的信号。根据原理图,对相乘信号进行高通滤波,得到和频信号。上面一路混频的 Simulink 仿真图如图 2 所示,下面一路与之类似。

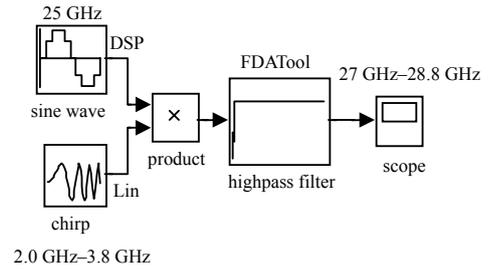


Fig.2 Mixing module
图2 混频模块

2.3 倍频模块

为了方便实现,本文使用相乘滤波进行倍频。一个初始频率为 f 的信号经过一系列相乘滤波可以得到任意倍频的信号,在本仿真中的三路 12 倍频采用相同的方法,基本原理如图 3 所示,与之相对应的 Simulink 模块如图 4 所示。

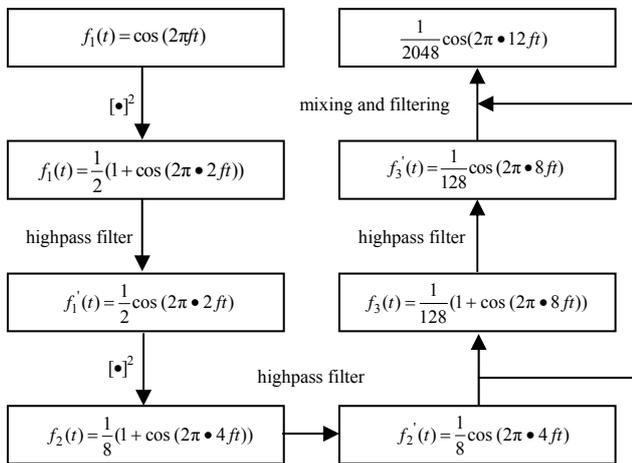


Fig.3 Frequency multiplication flowchart
图3 倍频流程图核对原图

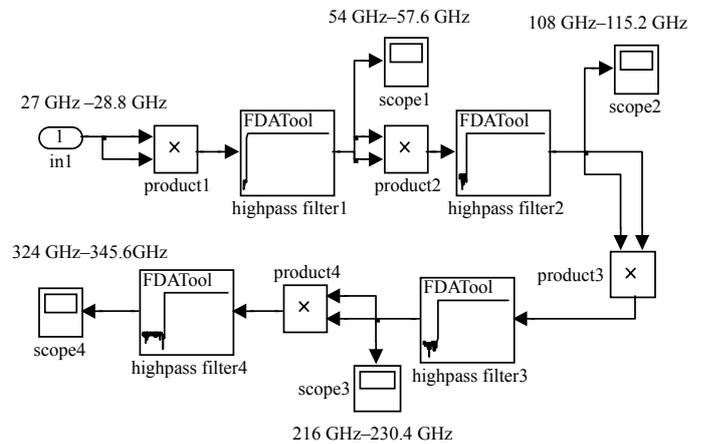


Fig.4 12-octave module
图4 12 倍频模块

在倍频过程中,最重要的是滤波器的设计。为了使输出信号中杂波尽可能小,需要适当减小滤波器的 A_{stop} 值,或者进行多次滤波。其他两路倍频采用类似的方法,在此不再赘述。

2.4 解调模块

接收机处理的主要功能是将雷达信号中心频率变换到基带,同时测量相位信息。I/Q 解调是一种经典的接收机设计方法,原理如图 5 所示。

接收到的信号被分离到 2 个相互正交的通道。一个通道称为接收机同相通道或 I 通道,在这个通道,接收信号和一个振荡器进行混频,该振荡器称为“本振”,其频率与雷达中心频率相同。混频产生了差频与和频 2 个分量,其中 I 通道:

$$I: 2 \sin(\omega t) A(t) \sin[\omega t + \theta(t)] = A(t) \cos[\theta(t)] - A(t) \cos[2\omega t + \theta(t)] \quad (3)$$

滤掉和频分量之后,就留下了调制项 $A(t) \cos[\theta(t)]$ 。

另一个通道称为接收机正交通道或 Q 通道,在这个通道,接收信号也和本振混频,但在混频之前本振要移相 90° ,即:

$$Q: 2 \cos(\omega t) A(t) \sin[\omega t + \theta(t)] = A(t) \sin[\theta(t)] + A(t) \sin[2\omega t + \theta(t)] \quad (4)$$

滤掉和频分量后,留下调制项 $A(t) \sin[\theta(t)]$ 。

与之对应的 Simulink 仿真图如图 6 所示。

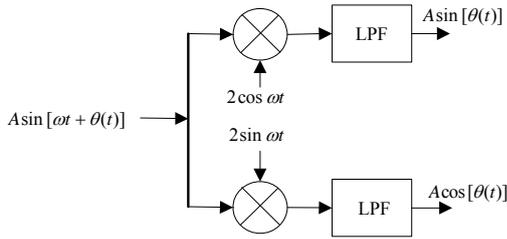


Fig.5 Schematic diagram of I/Q quadrature demodulation
图 5 I/Q 正交解调原理框图

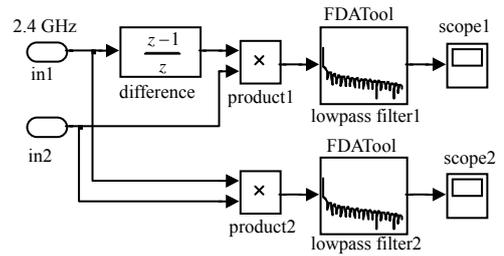


Fig.6 Block of I/Q quadrature demodulation simulation
图 6 I/Q 正交解调仿真图

3 仿真结果与分析

采用上述 Simulink 系统对一个 335 GHz 雷达进行了仿真。本振 25 GHz,24.8 GHz 及其差频信号分别经过 3 路 12 倍频,分别得到一个 324 GHz~345.6 GHz 发射信号、一个 321.6 GHz~343.2 GHz 解调参考信号和一个 2.4 GHz 正交解调用本振信号,其频谱分别如图 7、图 8 和图 9 所示。

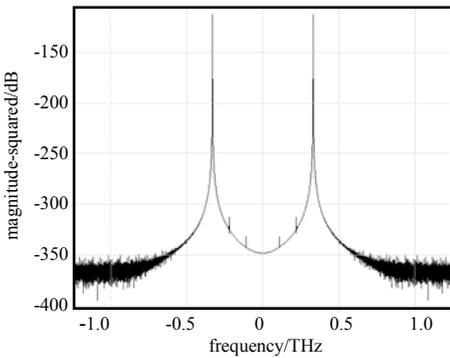


Fig.7 Spectrum of the 324 GHz~345.6 GHz transmitted signal
图 7 324 GHz~345.6 GHz 的发射信号频谱

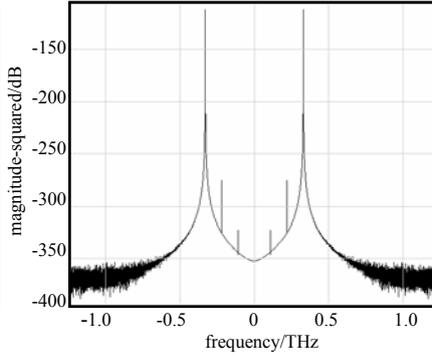


Fig.8 Spectrum of the 321.6 GHz~343.2 GHz reference signal for demodulation
图 8 321.6 GHz~343.2 GHz 的解调参考信号频谱

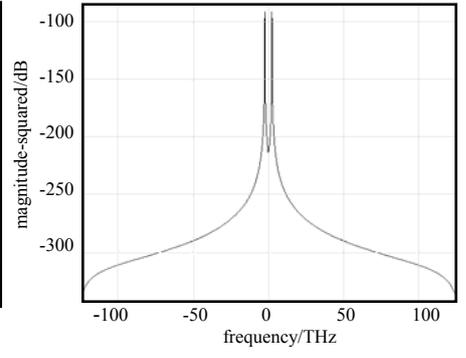


Fig.9 2.4 GHz local oscillating signal for quadrature demodulation
图 9 2.4 GHz 的正交解调用本振信号

从图 7、图 8 可以看出,在 Simulink 中,信号经过倍频能够得到比较高的频率,但是由于频率较高时滤波器性能影响较大,得到的高频信号中含有杂波,图中可见在 110 GHz,220 GHz 左右有一定幅度的杂波,但是可以通过多次滤波将其减小到比信号低 100 dB 以下,以致可以忽略。从图 9 可以看到,在较低频段 Simulink 倍频效果较好,能够得到比较理想的 2.4 GHz 信号。

仿真中假设在距离发射天线 10 m,13 m,16 m 处各有一个点目标。在理想情况下,不考虑信号的畸变和衰减,可以计算出 3 个目标所对应的频率。经计算,得到 3 个点目标对应的频率分别为 1.44 GHz,1.872 GHz 和 2.304 GHz。通过仿真,得到的 I,Q 通道的信号频谱分别如图 10、图 11 所示。

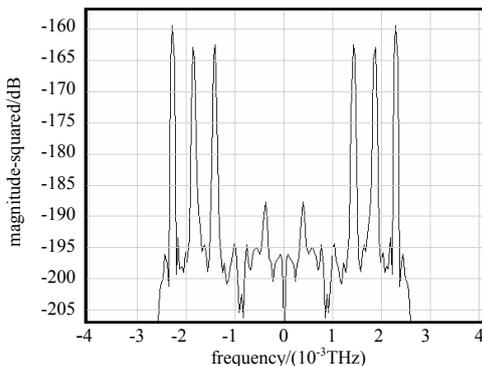


Fig.10 Spectrum of the channel I signal
图 10 I 通道信号频谱

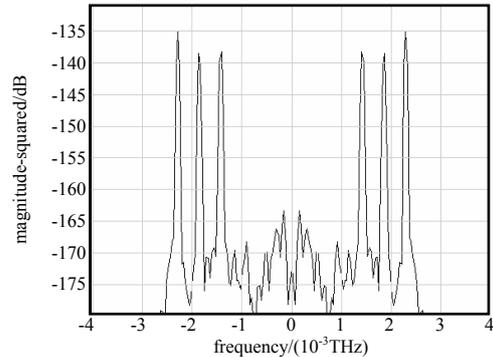


Fig.11 Spectrum of the channel Q signal
图 11 Q 通道信号频谱

从图 10、图 11 可以看出, 仿真结果与计算结果基本吻合, 所得到的 3 个波峰分别对应假设的 3 个目标点, 它们的频率分别在 1.44 GHz, 1.872 GHz 和 2.304 GHz 左右。但是也可以看到, 信号中含有杂波, 这主要有两方面原因: 一是倍频信号不纯, 二是在回波信号中加入了白噪声。

上述结果初步验证了所设计系统的合理性。

4 结论

综上所述, Simulink 可以对太赫兹雷达系统进行很好的仿真, 这对系统方案优化设计和器件选型具有重要的指导意义。基于 Simulink 强大的模块库和优越的计算能力, 可以构建丰富的模块来模拟实际从基带到射频的物理器件。同时, Simulink 良好的开放性也使得可以根据自己的需要来开发新的模块, 以增强 Simulink 自身的功能。但是, 在仿真中也发现了 Simulink 在太赫兹频段仿真中速率具有局限性, 需要根据实际情况在仿真速度、仿真时间、仿真精度几个方面做出权衡。另外, 与通信和信号处理模块库相比, Simulink 自带的射频模块库包含模块较少, 难以满足实际需要。最后需要说明, 尽管考虑了噪声影响, 本文目前只是在原理上对太赫兹雷达系统进行仿真。出于更加逼真仿真的需要, 一方面需要在本文系统中加入更多的模块, 如晶振、功率放大器、低噪声放大器、耦合器、隔离器等; 另一方面更重要的是需要按照实际器件的特性和水平对各个模块加入误差或噪声模型, 体现信号平坦度、线性度、增益衰减、系统损耗、噪声系数、幅相一致性等影响。这正是下一步重点开展的研究工作。

参考文献:

- [1] 王忆锋, 毛京湘. 太赫兹技术的发展现状及应用前景分析[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 1-4, 41.
- [2] 杨光鲲, 袁斌, 谢东彦, 等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 376-380.
- [3] 朱彬, 陈彦, 邓科, 等. 太赫兹科学技术及其应用[J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 304-307.
- [4] Dengler R J, Cooper K B, Chattopadhyay G, et al. 600 GHz Imaging Radar with 2 cm Range Resolution[C]// IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, 2007. Honolulu, HI: [s.n.], 2007: 1371-1374.
- [5] Bryllert T, Cooper K B, Dengler R J, et al. A 600 GHz imaging radar for concealed objects detection[C]// 2009 IEEE Radar Conference. Pasadena, CA: [s.n.], 2009: 1-3.
- [6] Dahlba X, Ck R, Rubaek T, et al. A 340 GHz CW non-linear imaging system[C]// 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2010. Rome: [s.n.], 2010: 1-2.
- [7] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(4): 373-377.
- [8] 张雅歌, 骆丽萍, 黄洁. 基于 LabVIEW 的雷达信号仿真系统设计[J]. 数字技术与应用, 2011(4): 141-142.
- [9] 姜通, 韦高, 孙文昌. 基于 ADS 的 LFM 脉压雷达系统建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(8): 5-8, 17.
- [10] 徐小平, 刘建新, 韩宇, 等. FMCW 测距雷达数字信号处理器设计仿真[J]. 信息与电子工程, 2004, 2(2): 133-135.
- [11] 毕大平, 祝本玉. 雷达电子战仿真系统设计[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(4): 393-396.
- [12] 吕品品, 付强. LabVIEW 与 Matlab 在雷达信号仿真中的应用[J]. 火控雷达技术, 2010, 39(2): 45-48.

作者简介:



杨 琪(1989-), 男, 陕西省渭南市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹雷达系统仿真技术. email: 424206134@qq.com.

邓 彬(1981-), 男, 山东省邹城市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为合成孔径雷达、太赫兹雷达成像。

王宏强(1970-), 男, 陕西省凤翔市人, 博士, 研究员, 863 太赫兹专家, 中国兵工学会太赫兹应用技术专业委员会委员, 主要研究方向为太赫兹技术、目标识别、雷达信号处理。

秦玉亮(1980-), 男, 山东省潍坊市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理、目标识别、量子雷达。

丁文霞(1973-), 女, 湖南省湘潭市人, 博士, 副教授, 主要研究领域为信息安全、电路与系统、数字视频处理等。