

0.34 THz 肖特基二极管高速 OOK 信号直接检波器

田遥岭^{1,2}, 蒋均^{1,2}, 黄昆^{1,2}, 缪丽^{1,2}, 陆彬^{1,2}, 邓贤进^{1,2}

- (1. 中国工程物理研究院 微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200;
2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了满足 340 GHz 高速 OOK 无线通信的需求, 完成了 340 GHz 零偏置波导检波器的设计、加工和测试。首先, 在高频电磁仿真软件 HFSS 中对准垂直结构二极管(QVD)进行建模仿真, 并结合二极管的非线性模型确定二极管的阻抗; 随后设计了输入波导-微带转换以及低通滤波器等无源结构, 并同时对接二极管进行阻抗匹配; 最后进行了检波器的加工和测试。测试结果表明该检波器的电压灵敏度在 334 GHz 时最佳, 最大值为 2 210 V/W, 并且在 315 GHz~357 GHz 频率范围内的典型值为 1 400 V/W, 其对应的等效噪声功率典型值为 $5 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$ 。最后, 还利用该检波器进行了 340 GHz 频段的高速 OOK 信号接收实验, 结果表明, 该检波器能够近乎无误地检测 10 Gbps 的 OOK 信号, 并且在 OOK 信号速率为 15 Gbps 时, 检波器解调得到的误码率为 3.15×10^{-7} , 证明了该检波器的高速信号检测能力能够满足高速 OOK 无线通信系统的需求。

关键词: 检波器; 开关调制(OOK); 340 GHz; 肖特基二极管

中图分类号: TN722.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0822001

0.34 THz high speed on-off keying (OOK) signal direct detector based on Schottky diode

Tian Yaoling^{1,2}, Jiang Jun^{1,2}, Huang Kun^{1,2}, Miao Li^{1,2}, Lu Bin^{1,2}, Deng Xianjin^{1,2}

- (1. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China;
2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: To meet the requirement of high speed OOK wireless communication, a 340 GHz waveguide zero-bias detector was designed, fabricated and measured. Firstly, high frequency electromagnetic software HFSS was adopted to establish the accurate model of the quasi vertical diode (QVD) according to its physical structure, from which impedance of the diode could be extracted with the nonlinear equivalent model of the diode. Then, passive circuits such as waveguide to microstrip transition structure and lowpass filter (LPF) were designed, which also had the function of impedance match. Finally, the designed detector had been fabricated and measured. The measured results show that the detector has a peak responsivity of 2210 V/W at 334 GHz and a typical responsivity of 1400 V/W over the frequency range from 315 to 357 GHz, with a typical noise equivalent power of $5 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$. At last, the proposed detector

收稿日期: 2016-12-17; 修订日期: 2017-01-23

基金项目: 国家重点基础发展研究计划(2015CB755406)

作者简介: 田遥岭(1991-), 男, 研究实习员, 硕士, 主要从事毫米波与太赫兹波电路设计方面的研究。Email: tianyaoling@126.com

通讯作者: 邓贤进(1973-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事电磁场理论、微波技术、收发信道系统技术、太赫兹通信系统技术方面的研究。

Email: dxjzmx@126.com

was selected to carrier out the 340 GHz high speed OOK signal demodulation experiment. And results show a bit error rate (BER) below 10^{-12} at 10 Gb/s and a bit error rate (BER) of 3.15×10^{-7} at data rate up to 15 Gb/s at room temperature, which proves that the detector can well meet the requirement of high data rate OOK communication system.

Key words: detector; OOK; 340 GHz; Schottky diode

0 引言

近年来,太赫兹波以其独特的性能在 THz 通信、THz 成像^[1-6]等应用领域受到广泛的关注。传统的高阶体制通信(如 QAM, PSK 等)虽然具有较高的信道利用率,接收灵敏度高,但是其系统复杂度高,限制了系统的小型化。反之,ASK/OOK 体制的通信系统具有最为简单的系统结构,其直接检测的方式省略去了接收端的载波恢复电路,降低了系统功耗及复杂度,有利于系统的集成小型化,并且这种体制对信道幅相特性要求不高,适用于近距离超高速无线通信。因此,作为 OOK 体制接收端的关键检测器件,肖特基二极管检波器在近年来有了较大的发展。国外以 VDI 为代表,其二极管检波器系列产品具有较高的性能,100 GHz 频段的检波器具有 4 000 V/W 的典型灵敏度,在 900 GHz 频段则具有 400 V/W 的典型灵敏度^[7]。在国内,姚常飞^[8]等人实现了 0.11~0.17 THz 的检波器,其灵敏度典型值为 600 V/W;另外,中国科学院微电子研究所的张建军^[9]等人也实现了 270 GHz 的零偏置检波器,在 260~280 GHz 的频率范围内达到了 1400 V/W 的典型灵敏度和 18 pW/Hz^{0.5} 的典型等效噪声功率。但是国内对太赫兹二元幅度调制(ASK/OOK)体制直接检波器的报道几乎没有,并且其对检波器性能的指标要求也不相同。在应用于高速 OOK/ASK 无线通信时,要求相应的直接检波器具有快速响应能力、支持高速通信的大带宽以及极低的等效噪声功率特性等。

文中利用高性能的低势垒肖特基二极管设计了一种 340 GHz 的零偏置波导式检波器。为了实现良好的检波器性能,选用了一种准垂直结构的肖特基二极管 3DSF5,该二极管具有高灵敏度,极低势垒等特性,十分适合运动到零偏置检波器的设计中。通过 ADS 结合 HFSS 优化设计检波电路的滤波、匹

配、探针等结构,设计了性能优良的检波器模块,并进行了加工装配。该检波器在测试频带内的电压灵敏度为 910~2 210 V/W,得到了 3.2~7.8 pW/Hz^{0.5} 的等效噪声功率 NEP,实现了极佳的性能。随后利用该检波器搭建了 340 GHz 的 OOK 接收机,并实现了高达 18 Gbps 的高速 OOK 无线通信,并分析了影响接收端检测性能的关键因素,验证了文中所设计检波器的高速 OOK 信号检测能力。

1 340 GHz 检波器电路设计

检波器电路的设计与优化采用了“联合仿真”的方法。首先确定了采用串联式的二极管检波器电路形式,选取 3DSF 系列的二极管和 50 μm 厚石英基板的微带线进行设计,检波器的电路结构图如图 1 所示。其次,通过电子扫描显微镜的测量,根据电路形式和二极管边界条件,在 HFSS 软件中建立了二极管的三维模型,并由此获得二极管的 S 参数文件,并由此将一些寄生参数纳入考虑。另外,ADS 的谐波平衡仿真用来确定电路的最佳输入输出阻抗。最后,根据该阻抗值来实现各部分无源电路的设计,基于各个部分网络建立整体模型进行仿真验证。

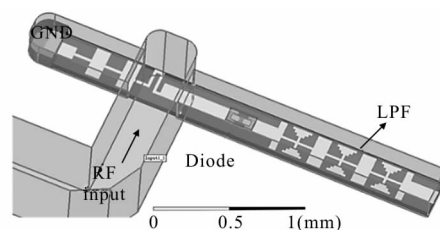


图 1 0.34 THz 检波器的结构图

Fig.1 Structure of 0.34 THz detector

1.1 检波二极管

文中采用了一种具有准垂直结构的低势垒肖特基二极管。该二极管结区背面的金属形成了具有相当大势垒的欧姆接触,可以等效为并联的大电容和大电阻。该欧姆接触对直流信号体现出高阻特性,使

得直流低频信号在二极管内形成类似于平面二极管的场分布。而对高频信号而言,该欧姆接触相当于短路,造成了类似于垂直结构二极管的场分布。二极管结区的侧视图如图 2(a)所示。

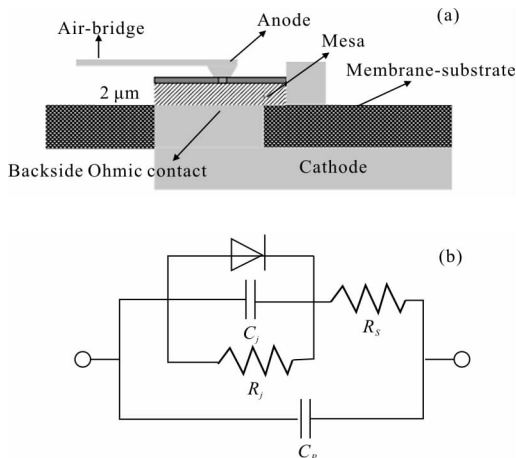


图 2 准垂直结构二极管结区截面图(a)和二极管的非线性等效电路(b)

Fig.2 Cross section of the QVD structure diode(a) and nonlinear equivalent circuit of the diode(b)

二极管的尺寸参数为 $140\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$,该尺寸与工作频段的波长是可比拟的,二极管的结构将会对场分布有不可忽视的影响。因此检波器的精确设计在很大程度上是依赖于二极管的精确三维模型分析的。在 HFSS 中建立二极管三维模型时,为了尽量减少仿真难度,将高掺杂的介质材料近似为 PEC,而其他材料均近似为无耗媒介。根据二极管的物理结构和上述参数近似,建立了二极管的 3D 模型如图 3 所示。该模型的仿真结果将以 S 参数的形式导入到 ADS 中与二极管的非线性等效电路模型进行联合仿真与优化设计。

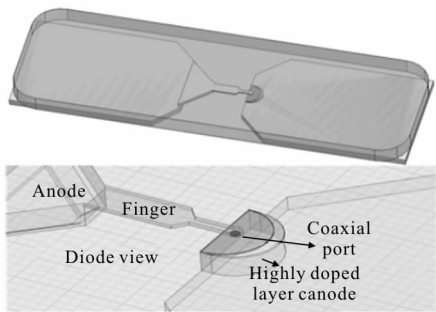


图 3 HFSS 中二极管的 3D 模型
Fig.3 3D model of the diode in HFSS

1.2 检波器的设计

1.2.1 无源结构设计

检波器的所有无源结构都在 HFSS 中进行设计与分析。为了减少仿真难度和时间,将检波器分为输入波导-微带转换结构、阻抗匹配网络和低通滤波器三个部分进行设计。为了尽量缩短整个检波电路的长度,阻抗匹配在输入转换结构中实现。

进行优化设计后得到的结构模型及其输出阻抗性能如图 4 所示。由图 4 可知,在 310~380 GHz 的范围内探针结构输出阻抗的实部在 $21\sim 31\ \Omega$ 范围层线性变化,而输出阻抗的虚部则在 $-30.5\sim -25.7\ \Omega$ 的范围内线性变化,与二极管的输入阻抗值呈现较好的匹配关系,能够较好地实现阻抗匹配,符合设计要求。

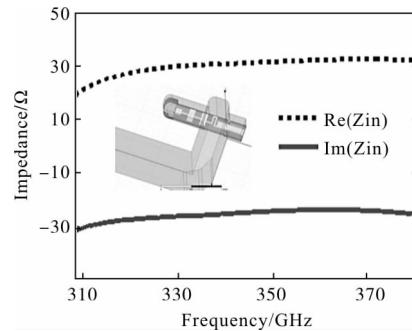


图 4 0.34 THz 微带转换结构及其微带端口输出阻抗
Fig.4 Structure of the 0.34 THz waveguide to microstrip transition and output impedance of the microstrip port

检波二极管对调制信号进行检波过后,需要在中频放大器前面加载低通滤波器以提取出中频检波信号。性能好的 LPF 将使电路具有较高的隔离度,降低前后电路的负载牵引作用,并且能够更好地反射载波信号以增大检波灵敏度,因此滤波器的选取将极大地影响整体电路的阻抗匹配过程。为了实现较高的滤波器带外抑制制度,并且尽量缩短滤波器的电路长度,选用了如图 5 所示的滤波器结构单元。该

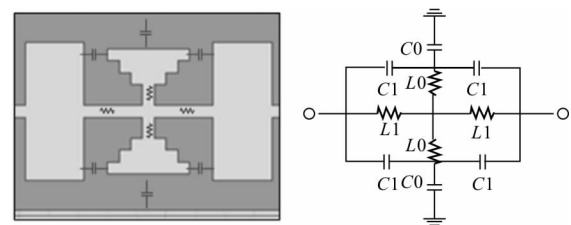


图 5 CMRC 滤波器单元结构及其等效电路
Fig.5 Structure and equivalent circuit of the CMRC filter unit

滤波器单元能够在射频信号频段实现很高的抑制度,能够在很短的电路中实现很高阶的滤波器特性。

利用图 4 中的滤波器单元进行级联,优化设计后得到了如图 6(a) 所示的低通滤波器。该低通滤波器在 150 GHz 以下频带具有较好的低通性能,而在 270~400 GHz 范围内的带外抑制度高达 80 dB,且其寄生通带在 400 GHz 以上,该滤波器具有较高的滤波性能,能够较好地抑制掉射频信号,足以满足检波器输出端提取视频信号的需求。

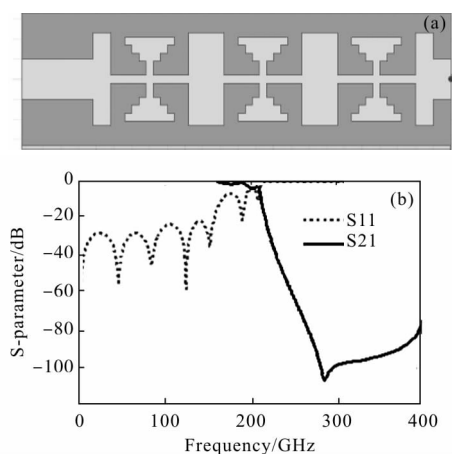


图 6 设计得到的低通滤波器(a)和 LPF 的 S 参数性能(b)
Fig.6 Designed CMRC LPF (a) and S-parameter of the proposed LPF (b)

1.2.2 检波电路优化设计

整个检波器电路加工在介电常数为 3.78,厚度为 50 μm 的石英基板上。输入波导微带转换结构、低通滤波器以及相关的阻抗匹配网络已经在 1.2.1 节中有所讨论。检波电路各个部分分别进行优化设计,并将各部分电路的 S 参数文件导入 ADS 进行整体联合仿真,继续优化。最终优化设计后得到了如图 7 所示的检波器模块细节图。其测试将在下一章中进行。

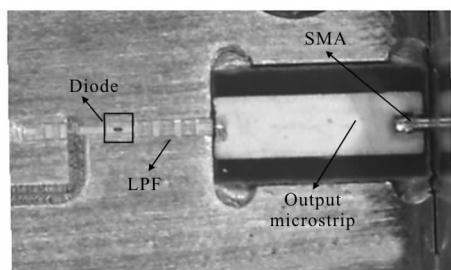


图 7 检波器模块的照片
Fig.7 Photograph of the fabricated detector block

2 检波器的测试与分析

2.1 检波器的灵敏度与等效噪声功率测试

电压灵敏度表征了检波器将输入功率转换为直流或低频信号电压的能力,是衡量检波器检波能力的主要参数。图 8 给出了测试检波器电压灵敏度的系统结构框图。采用的示波器具有 1 M Ω 和 50 Ω 两种阻抗,在测试检波器的电压灵敏度时,选用 1 M Ω 的阻抗进行测试。LO 输入信号可变范围为 13.16~14.9 GHz,经过 24 次倍频后得到 315.84~357.6 GHz 的射频信号,该信号经 OOK 调制器调制后得到相应的 OOK 信号。

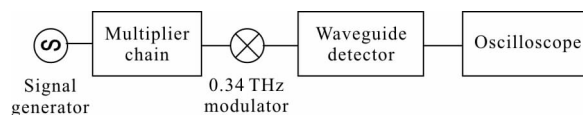


图 8 测试检波器灵敏度的系统架构图
Fig.8 Diagram of the test system used to measure the detector responsivity

在测试检波器的电压灵敏度时,保持检波器的输入功率在 -20 dBm,并调整使本振信号频率按 20 MHz 为间隔扫频,在示波器上读出相应电压的值,可测得检波器的仿真和实测电压灵敏度如图 9 所示。可见该检波器的测试电压灵敏度在 315~357 GHz 的频率范围内均大于 1000 V/W,且在 334 GHz 附近具有最大灵敏度 2300 V/W,在整个频带内的灵敏度波动在 3 dB 以内。另外,仿真结果与测试结果仍具有一定的差异,实测灵敏度低于仿真值,符合预期。

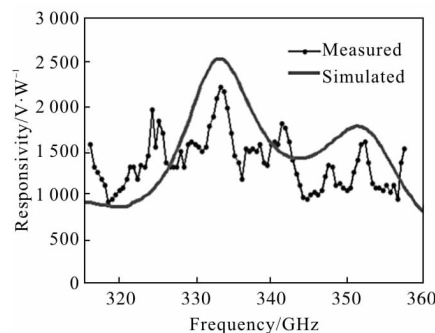


图 9 检波器灵敏度的测试结果与仿真结果
Fig.9 Measured and simulated responsivity of the detector

等效噪声功率 NEP 是衡量检波器噪声的主要指标,也是 OOK 接收机性能计算中的重要指标之一。

文中通过测试检波器的噪声电压并利用检波器的检波灵敏度计算得到其等效噪声功率如图 10 所示。

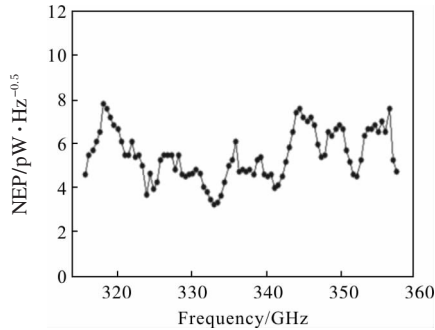


图 10 测试得到的检波器等效噪声功率

Fig.10 Measured noise equivalent power of the detector

2.2 接收机性能测试与分析

2.2.1 接收机性能测试

0.34 THz 直接检波器以及视频信号放大器就组成了简易的 OOK 接收机，缺少 340 GHz 低噪声使得该 OOK 接收机的噪声远大于检波器本身。图 11 为测试得到的 OOK 接收机的检波电压灵敏度与等效噪声功率 NEP。由图 11 可知接收机在 315~357 GHz 频段内具有 960~2 350 V/W 的检测灵敏度，很接近 1MΩ 时检波器的灵敏度。另外，接收机的 NEP 在 37~92 pW/Hz^{0.5} 的范围内，远远大于检波器本身的噪声功率，且噪声最主要的来源是低频电压放大器。

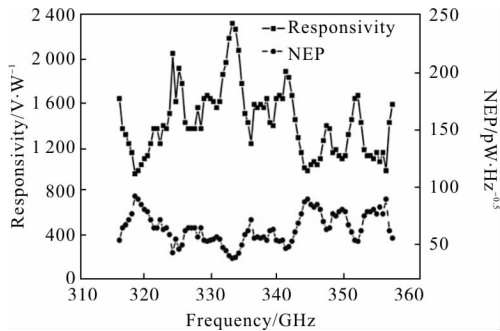


图 11 接收机的灵敏度和等效噪声功率

Fig.11 Measured responsivity and NEP of the receiver

在测试中，为了尽量增大接收端的信噪比，在测试接收机的高速信号检测能力时采用了如图 12 所示的“背靠背”测试方案，即将调制后的射频信号直接输入检波器进行检测得到输出。信号源输出的信号经过倍频链路后，由 340 GHz 的 OOK 无源调制器进行调制，得到包含伪随机序列 PRBS 的 OOK

信号。在接收端由文中设计的检波器进行检测，并在误码率分析仪中进行误码率计算，以衡量接收机性能。

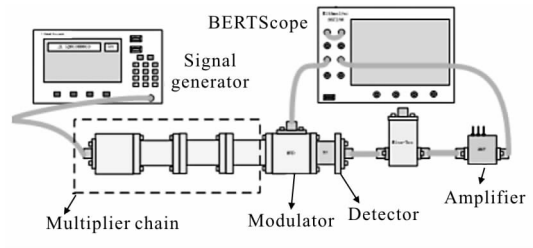


图 12 OOK 接收机测试平台示意图

Fig.12 Framework of the OOK system used to test the receiver

利用上述测试系统，在载波频率为 334 GHz 时进行接收误码率测试。通过误码率分析仪测试了误码率随数据率的变化关系如图 13 所示。由图 13 可以看出，该接收机在数据率不超过 10 Gbps 时其误码率是小于 10⁻¹² 的，当数据率达到 15 Gbps 时，测试误码率达到 3.15×10⁻⁷，接收性能有了较大的恶化，并且由图 13 可以看出，在 15 Gbps 时眼图已经有了一定程度的失真，主要是在上升沿处产生的失真，这是误码率恶化的重要原因。这个失真主要是由于检波电路中采用了高抑制度的 LPF，其滤除了部分频谱分量，造成了检波波形的失真，当然，电路中的其他寄生参量也是部分原因。

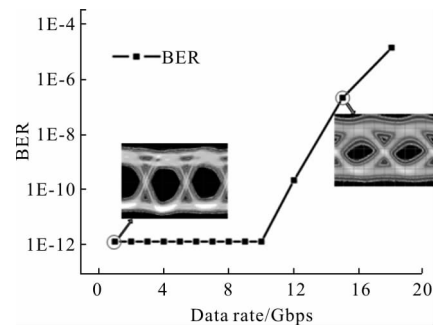


图 13 载波为 334 GHz 时误码率随数据率关系

Fig.13 Measured BER versus data rate at a carrier frequency of 334 GHz

2.2.2 接收机性能分析

由图 13 可知，当数据率上升到 18 Gbps 后，其误码率已经达到了 10⁻⁵ 量级，在这种通信速率下已经不适合运行。但是，检波器的带宽其实是可以支持 40 GHz 的视频带宽的，造成接收机性能未达预期的主要原因主要可能是所采用的 OOK 调制器仅具有

有限的“开-关”隔离度,存在的射频本振泄露将会造成较大的误码率恶化。接下来将分析 OOK 调制器的本振泄露对接收机误码率性能恶化的影响。

文中使用的 OOK 调制器是参考文献[10]中的无源芯片调制器,在封装后其隔离度只有 10 dB 左右,在一些频段甚至达到 8 dB,这是存在不可忽视的本振泄露的。在这种条件下得到的 OOK 信号电压波形如图14所示。在数据为“1”时的输出射频信号为 V_{ON} ,在数据为“0”时的输出信号为 V_{OFF} 。由图 14 可见, V_{OFF} 并不为零。 V_{OFF} 是由调制器的射频本振泄露造成的,在分析射频泄露影响时假设 V_{OFF} 和 V_{ON} 满足关系 $V_{OFF}=\alpha V_{ON}$,其中 $0<\alpha<1$ 。可以看出,当 $\alpha=0$ 时为理想的 OOK 调制结果,而当 $\alpha=-1$ 时为 BPSK 的调制体制。

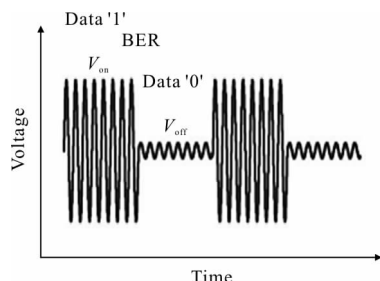


图 14 有本振泄露时的 OOK 电压波形

Fig.14 Voltage waveform of the OOK signals with LO leakage

根据参考文献[11],非相干直接检测方式的接收机的误码率和 α 之间的关系为:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b(1-\alpha)^2}{2N_0(1+\alpha^2)}} \right)$$

式中: E_b/N_0 为每比特信号能量与噪声功率谱密度之比。由于 OOK 体制的相干和非相干解调的性能实际上差距并不大^[11],且变化趋势相同,故非相干检测的性能受本振泄露的影响趋势可以通过相干条件下的分析结果近似得到。图 15 为 OOK 体制接收机误码率性能随着 OOK 调制器“开关隔离度”的变化关系。由图 15(b)可以看出,当 α 在 0.1~0.56 时,OOK 信号的开关隔离度为 5~20 dB,要实现 BER 为 10^{-12} 的解调误码率,其所需的 E_b/N_0 将比理想条件的值大 1~8.3 dB。因此,对于文中的 OOK 接收机而言,由于其检测的 OOK 信号的“开关隔离度”小于 10 dB (受限于 OOK 调制器),即 $\alpha>0.32$ 。又根据 E_b/N_0 同

信噪比 SNR 的关系,可以推断要达到同样的误码率,检测前文测试所用的 OOK 信号所需的 SNR 将至少比检测理想 OOK 信号时所需的信噪比大 4 dB,当隔离度只有 5 dB 时,则至少要大 8.3 dB。因此,提高调制器的开关隔离度以减少本振泄露是提高误码率性能的一个重要的方法;当然开发出 340 GHz 的低噪声放大器也是提升性能的关键,这将是进一步改进的工作。

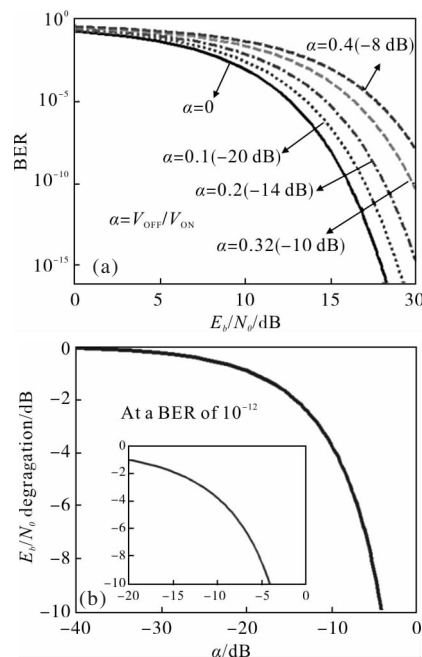


图 15 OOK 体制的误码率特性受射频泄露的影响(a)和固定 BER 为 10^{-12} 时理想情况下 E_b/N_0 与不同 α 时的差值(b)

Fig.15 Influence of the LO leakage on BER of the OOK receiver(a) and difference between the E_b/N_0 of ideal condition and several α at a BER of 10^{-12} (b)

3 结 论

文中首先设计了基于肖特基二极管的波导式检波器,加工了在 315~357 GHz 频带范围内具有 1 400 V/W 典型灵敏度的零偏置二极管检波器,具有较好的噪声性能。为了研究 OOK 高速信号的实时接收,还利用该检波器进行了 OOK 高速信号的实时接收检测试验,验证了优良的高速信号检测性能。完成了 334 GHz 载波下的 10 Gbps 的无线 OOK 信号的实时检测,其检测误码率小于 10^{-12} ;另外,结果表明该检波器能够在数据率高达 15 Gbps 时其误码率为 3.15×10^{-7} ,并且在数据率为 18 Gbps

时也具有误码率为 10^{-4} 量级的检测能力。文章最后还分析了射频泄露对接收性能恶化的影响,深入地分析了 OOK 信号中的本振泄露大小与误码率的变化关系。总之,基于零偏置检波器的直接式 OOK 接收机具有简单的系统架构,较低的功耗,在短距离高速无线通信系统领域具有较大的应用前景和研究价值。

参考文献:

- [1] Wang Cheng, Lu Bin, Lin Changxing, et al. 0.34-THz wireless link based on high-order modulation for future wireless local area network applications [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(1): 75-85.
- [2] Wang Cheng, Lu Bin, Miao Li, et al. 0.34 THz T/R front-end for wireless communication [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(6): 1530-1534. (in Chinese)
王成, 陆彬, 缪丽, 等. 0.34 THz 无线通信收发前端[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(6): 1530-1534.
- [3] Liang Baowen, Ye Limin, Lv Zhaoshun, et al. Design of two-dimensional THz imaging optical system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(5): 053103. (in Chinese)
梁宝雯, 叶利民, 吕照顺, 等. 二维太赫兹探测成像光学系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(5): 053103.
- [4] Yang Yang, Yao Jianquan, Wang Li, et al. Experimental study on the radar cross section of low frequency terahertz standard target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 985-989. (in Chinese)
杨洋, 姚建铨, 王力, 等. 低频太赫兹标准目标雷达散射截面的实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 985-989.
- [5] Jiang Ge, Cheng Binbin, Yang Chen, et al. Method for improving quality of 0.14 THz radar imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2912-2917. (in Chinese)
江舸, 成彬彬, 杨陈, 等. 提高 0.14 THz 雷达成像质量的新方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 2912-2917.
- [6] Gao Taichang, Li Shulei, Liu Lei, et al. Development study of THz instruments for atmospheric sounding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 56-67. (in Chinese)
高太长, 李书磊, 刘磊, 等. THz 波大气探测仪器发展现状研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 56-67.
- [7] Virginia Diodes, Inc. Detectors [EB/OL]. [2004-12-11]. <http://www.vadiodes.com/index.php/en/products/detectors>.
- [8] Yao Changfei, Zhou Ming, Luo Yunsheng, et al. Development of terahertz frequency solid state multiply sources and sensors with schottky barrier diode [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(3): 438-442. (in Chinese)
姚常飞, 周明, 罗运生, 等. 基于肖特基势垒二极管的太赫兹固态倍频源和检测器研制 [J]. *电子学报*, 2013, 41(3): 438-442.
- [9] Zhang Jianjun, Zhou Jingtao, Yang Chengyue, et al. A 270 GHz high performance waveguide detector utilizing a zero-bias Schottky diode [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2015, 34(1): 102-107. (in Chinese)
张建军, 周静涛, 杨成越, 等. 基于零偏置肖特基二极管的 270 GHz 高性能波导检波器[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(1): 102-107.
- [10] Deng Xiaodong, Li Yihu, Wu Wen. A fundamental OOK modulator for 340 GHz communication using 0.13 μm CMOS technology [J]. *Microwave Opt Technol Lett*, 2015, 57(5): 438-442.
- [11] Mehmet Uzunkol, Woorim Shin, Gabriel M Rebeiz. Design and analysis of a low-power 3-6-Gb/s 55-GHz OOK receiver with high-temperature performance [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(10): 3263-3271.