

毫米波电路中的传输线技术性能优化

罗杰斯公司 技术市场工程师 袁署光

摘要

在高频电路设计中，可以采用多种不同的传输线技术来进行信号的传输，如常见的同轴线、微带线、带状线和波导等。而对于 PCB 平面电路，微带线、带状线、共面波导（CPW），及介质集成波导（SIW）等是常用的传输线技术。但由于这几种 PCB 平面传输线的结构不同，导致其在信号传输时的场分布也各不相同，从而在 PCB 材料选择、设计和应用，特别是毫米波电路时表现出不同的电路性能。本文将以毫米波下通用的 PCB 平面传输线技术展开，讨论电路材料、设计等对毫米波电路性能的影响，以及如何优化。

1. 引言

几年前，毫米波电路还仅仅用于航天、卫星通信、通信回传等特殊专用的领域。然而，随着无线通信技术的飞速发展，对更高的数据传输速率、更小的传输延迟、更宽的带宽等需求促使毫米波频段逐渐被用在移动通信覆盖例如，802.11ad WiGig，5G 等领域；随着主动安全驾驶和未来无人驾驶技术的发展，汽车对测距测速的要求越来越高，毫米波也被使用在如 77GHz 的汽车雷达领域。但是，对于设计工程师来说，毫米波电路的设计与低频段射频电路设计存在着显著的不同。毫米波频段下不同传输线技术的色散辐射或高次模、阻抗匹配、信号的馈入技术等都将直接影响电路最终的性能。

2. 常用传输线技术

微带线是最为常用且结构最简单的传输线技术而被广泛使用。它仅仅依靠上层铜箔形成的信号线路、中间层介质和下层铜箔形成接地平面即可构成。结构非常简单且易于加工，性价比高，并能够满足不同结构的表面安装要求，如图 1 所示。接地共面波导（GCPW）结构与微带线相似，但在上层铜箔导体的两侧有接地平面，且通过金属过孔将上层和底层地平面相连。带状线的结构与微带线或共面波导线均不同，它的信号导体位于中间层，而上、下两层是接地平面而中间填充介质，几乎可以看作是扁平的同轴线结构。

如图 1 中场力线分布，微带线与 GCPW 的信号传播方向上并不存在场分量。但由于这两种传输线的电、磁场并不完全分布于电介质中，有少部分场力线位于空气中；导致信号在电介质中与空气中传输的 TEM 波的相速不同，其分界面并不能完全实现相位匹配。因此这两种传输线模式是准 TEM 波模式。而带状线的场力线上下对称分布于中间层介质中，因此带状线的传输模式是 TEM 波模式。

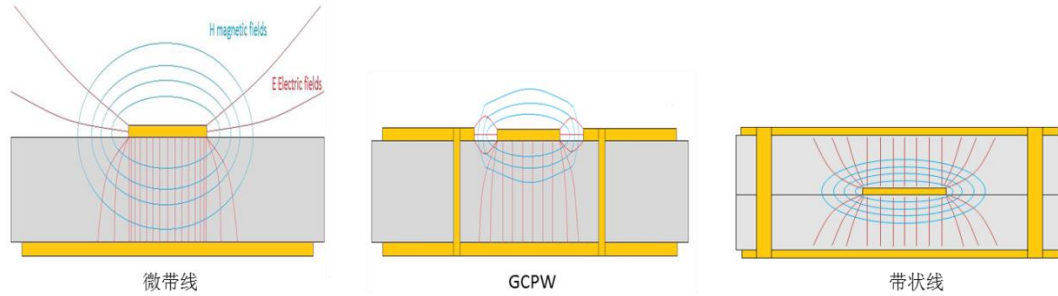


图 1 微带线，接地共面波导及带状线结构与场分布

SIW (Substrate integrated waveguide) 是近年来讨论较多，介于微带与介质填充波导之间的一种新型传输线。SIW 兼顾传统波导和微带传输线的优点，可实现高性能微波/毫米波的平面电路。其结构如图 2 所示，SIW 由上下两层金属、左右两排金属通孔、以及中间填充的介质构成。其将传统波导结构集成在介质基片中，实际上是一种介质填充的波导结构。SIW 中的电磁波被限制在上下金属层和两排金属孔之间的区域传播。由于电流的分布情况，在 SIW 中只能传播 TE_{n0} 波而不能传播 TM 或 $TE_{mn}(n \neq 0)$ 波，与矩形波导相似，SIW 传输的主模是 TE_{10} 模。

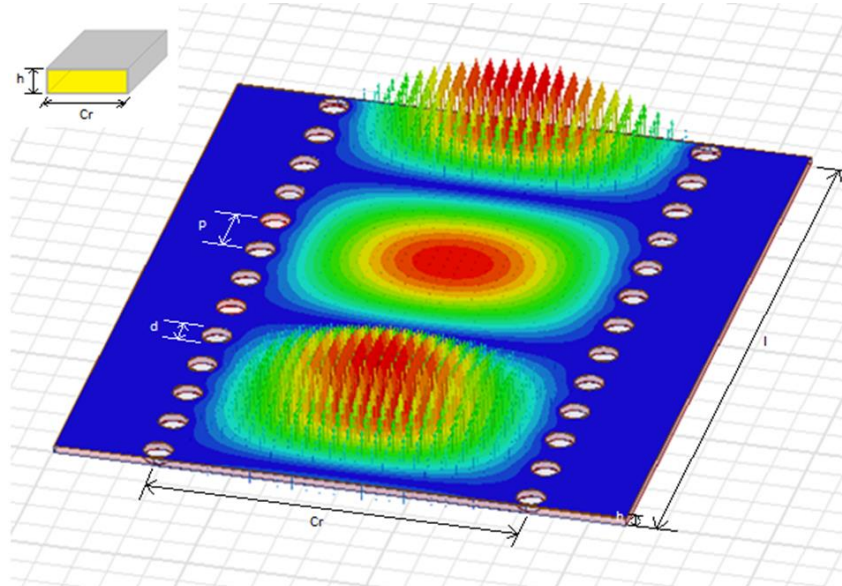


图 2 SIW 的结构与场分布

几种 PCB 平面传输线技术有各自的优点和缺点。例如 SIW 传输线，它具有如可应用于超高频段、辐射低、损耗低等优点，但由于其设计难度大、加工困难、不易与其他元件集成等缺点，使其相对于其他几种传输线来说并不被广泛应用。

3. 辐射损耗

对于 PCB 传输线电路，插入损耗主要包括介质损耗、导体损耗、辐射损耗和泄露损耗几个部分，是各种损耗成分的总和。泄露损耗通常是由于信号与地之间形成了泄露电流而导致的能量的损失。由于高频 PCB 材料具有较大的体电阻，泄露损耗很小，一般可以忽略。电路的导体损耗是传输线上信号路径的能量损失，是由导体自身的阻抗引起。介质损耗则是由构成电路的电路材料的耗散因子所决定，选择相对较小的损耗因子材料有利于电路总的插入损耗的减小。对于中低频段电路，电路的插入损耗主要由导体损耗和介质损耗有决定。而随着电路所应用的频率的不断升高，信号波长变短，特别是在毫米波频段，传输线的非闭合结构，以及传输线的横截面积与线宽等保持不变而使电路的辐射损耗就变得不可忽略。微带传输线尽管相对于上述其他三种在毫米波频段更容易产生辐射损耗和杂散模，但由于微带线具有的加工容易、设计简单、物理尺寸小、易于集成等诸多优点使得其仍然用于毫米波电路。那么在毫米波频段使用微带线时需要如何进行优化设计呢？

下面以 Rogers 公司的 MWI 软件来模拟计算同种材料不同厚度的 50Ω 微带线各部分损耗情况，来讨论毫米波频段下微带线损耗的优化设计，如图 3 所示。分别选取了 10mil 和 30mil 的两种厚度设计的 50Ω 微带线。从图中可以看到，当频率较低时，电路的辐射损耗几乎可以忽略不计，这时电路总的损耗主要由导体损耗和介质损耗所决定，基于 10mil 厚度的电路因导体线路窄具有高的导体损耗而导致总的损耗偏高。当频率升高时，相比 10mil 厚度的电路，可以看到基于 30mil 厚度的电路的辐射损耗显著且迅速增加，从而导致电路总的损耗值较大。这一变化说明对于毫米波电路应用，较厚的微带线路的辐射损耗占电路总损耗的较大部分。选择厚度较薄的电路材料，可以降低辐射损耗从而减小电路的插损。

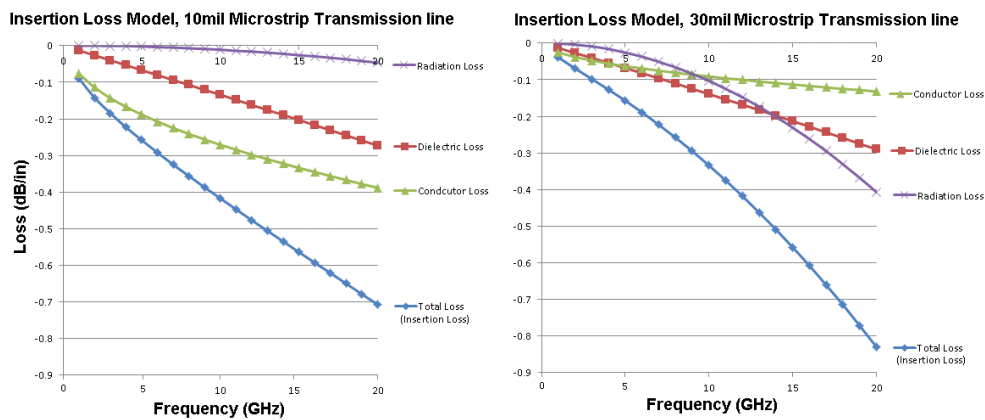


图 3 同种材料不同厚度下微带线的损耗

电路材料厚度的降低对辐射损耗的减小，也可以看作是减小了电路中寄生杂散模式的产生。电路中所传输的信号往往包含多个频率分量。由微波电路理论知道，当电路的厚度或宽度大于传输信号的 1/8 波长时，电路将产生杂散模。如图 4 所示，当使用的电路材料较厚，设计同一阻抗如 50Ω 线路也会较宽，如果这一厚度或宽度与所传输信号中的波长相比拟时，电路的性能

就将被恶化。以 16.6mil RO4350B™ 材料设计的 50Ω 微带线为例，此时微带线的宽度是 36mil。这一宽度对应的 1/4 波长的频率是 46.5GHz，而对应的 1/8 波长的频率是 23.8GHz。因此这一电路在高频段如 46.5GHz 时性能较差，而在小于 23.8GHz 时的波动较小、性能较好。

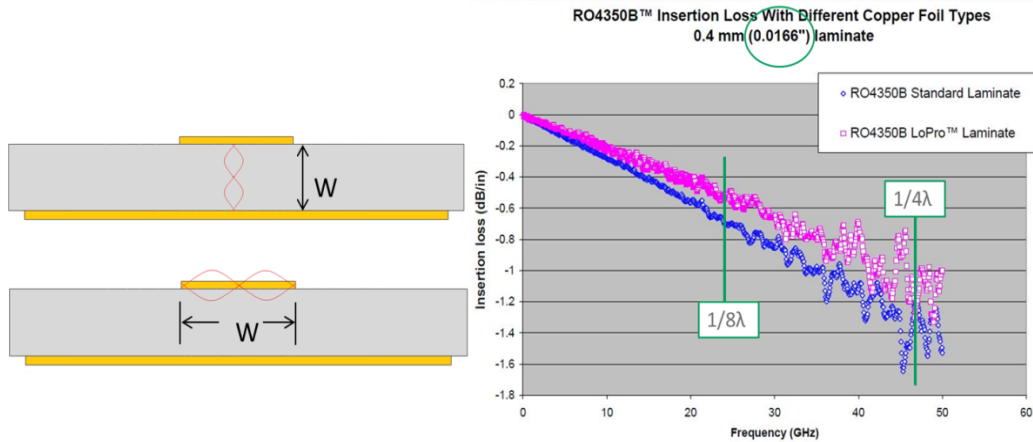


图 4 电路的波长与杂散模

GCPW 也是毫米波频段常用的传输线技术，具有较小的辐射损耗，其辐射损耗及电路总损耗也具有与微带线相类似的特性。电路的总损耗由于频率的升高而变大，特别是在毫米波频段电路损耗值的大小对于电路性能尤为重要。选用较薄的电路材料可以降低微带传输线在毫米波频段应用中的寄生杂散模和辐射损耗。较低的介质损耗材料，较光滑的材料铜箔可降低电路总的损耗值，进一步优化电路在毫米波频段下的性能。高介电常数会减小电路线宽，降低杂散模式的产生，但更窄的线宽使加工难度增加、一致性降低，容易增大批次间的波动。

4. 信号馈入的优化

毫米波频段传输线的良好线路设计和选材可使电路的性能得到优化，但要实现更好的性能，传输线的信号馈入设计也是非常重要的一个方面。信号馈入设计属于电路匹配设计的范畴，良好的馈入设计可使信号能量无损耗和无反射的流入电路中，进一步提升的电路性能。

4.1 微带线的信号馈入

微带线和 GCPW 的信号导体均在电路表层，它们的信号馈入示意图如图 5 所示。当连接器的中心导体 PIN 与信号导体完全连接时，增加了信号馈入点出的电容性。由传输线理论可以知道，微带线的特性阻抗与电路的感抗成正相关，与容抗呈反相关。电路中电容性的增加会使线路的阻抗降低，而电容性的减小（电感性增加）会使线路的阻抗增加。当馈入点处呈现较大的电容性时，可以通过减小馈入点处线路面积来减小电容，使其满足 50Ω 的完全匹配；同样，当馈

入点处呈现电感时，通过增大馈入点处的面积来增大电容。梯形线或渐变线是常用的增大或减小电容的方式，GCPW 的信号馈入也可以相同方式优化。

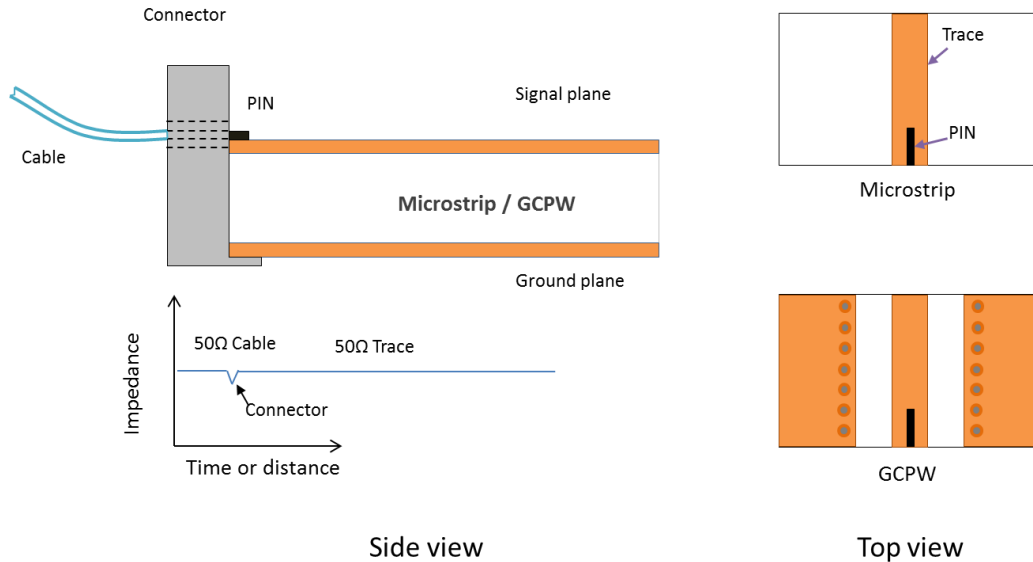


图 5 微带线/GCPW 信号馈入示意图

选取了 Rogers 的热固性材料为例，制作电路进行性能对比的实验，如图 6 所示。左图是没有进行优化之前的电路，其馈入点处阻抗远大于 50Ω，呈现较大的电感性而处于失配状态；此时电路的带宽窄，回波损耗在 6.8GHz 处已达到 -15dB；电路的插入损耗值也从 6.8GHz 开始出现较大的波动。而右图是采用渐变线进行优化后的电路，其馈入点处的阻抗基本与 50Ω 相接近。此时电路的带宽拓展至 30GHz 附近，而且其插入损耗也基本保持稳定。因此正确处理电路馈入点电感性或电容性的设计，可以使微带电路的性能得到了优化。

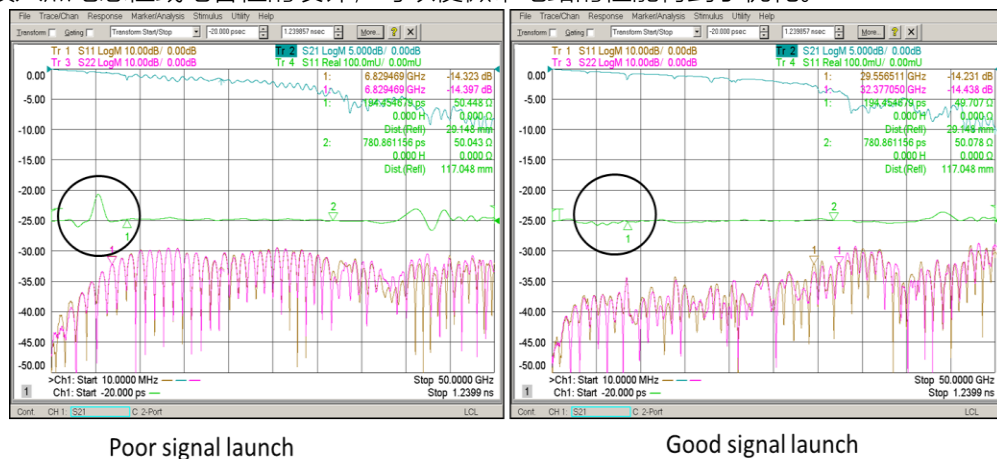


图 6 微带线信号馈入优化对比

4.2 GCPW 的优化设计

GCPW 的信号馈入的优化设计与微带线基本相同。但由于 GCPW 的结构与微带线结构不同，GCPW 两侧地平面过孔位置对其性能也存在显著影响。选取 Rogers 的 RO4350BTM 材料设计不同 GCPW 传输线，如图 7 所示。电路均采用相同的信号馈入设计，不同之处在于接地过孔的位置与间隔。从实际电路的测试看到，三个不同电路馈入点阻抗测试基本一致，具有较好的馈入点设计。可以看到#3 电路具有很好的插入损耗特性和回波特性，电路带宽能够达到 40GHz 以上。而对于#1 号电路，由于接地过孔位置与线路相隔较远，延长了信号回路路径，使在信号回路中产生了寄生的电感或电容，从而导致性能恶化，电路带宽只有约 30GHz。而#2 号电路的接地过孔位置相同，但减少了过孔的数量，导致两个相邻过孔之间并没有形成良好的电壁而产生强反射；#2 号电路的回波损耗和插入损耗带宽仅有约 13GHz。因此 GCPW 的接地过孔设计也是影响其性能的关键因素。通常，过孔的位置应尽量靠近线路，过孔的间距不得大于最高工作频率的 1/4 波长。



图 7 不同接地过孔位置的 GCPW 性能比较

4.3 带状线的信号馈入和优化

带状线的信号馈入设计与微带线和 GCPW 有所不同。因线路不在电路的表层，所以并不能使用表贴式而需要使用 PIN 针式连接器进行连接。如图 8 所示，信号的馈入需要通过 PTH 过孔

来完成。其过孔的设计需要考虑过孔大小、孔内铜厚、焊盘大小，孔与接地面之间的间距、以及过孔长度等参数的带来的影响。实验证明，增加过孔的大小、铜厚、焊盘大小以及过孔长度均使过孔的电容性增加；而过孔与接地面之间间距增加将会减小过孔的电容性，增加电感性。带状线的信号馈入连接器通过 PIN 针连接过孔的内壁，可以看着是过孔导体厚度增加，导致了过孔的电容性变大。在设计和加工中，可以通过背钻来移除部分过孔内部导体孔壁或增加接地间距的方式，达到减小电容性的目的。

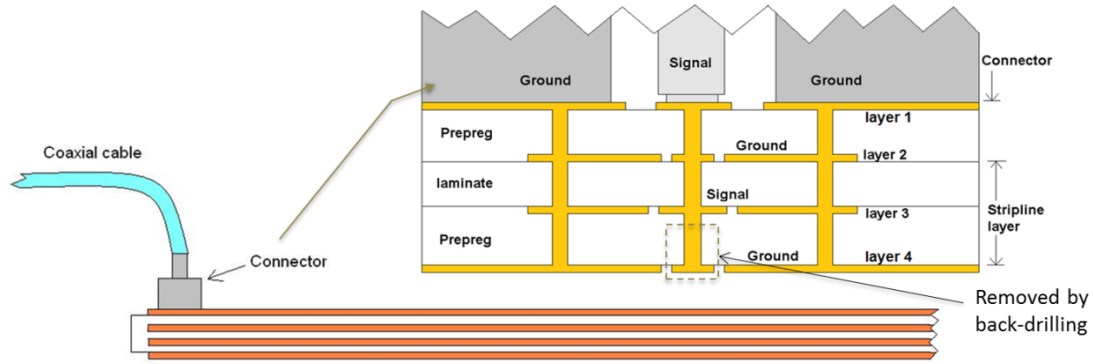


图 8 带状线信号馈入示意图

选取 7.3mil RO4350B Lopro™ 材料与 8mil RO4450F™ 半固化片制作了 50Ω 带状线电路，并设计不同的信号馈入过孔来评估不同设计对电路性能的影响。比较两个测试电路，它们具有相同的孔壁铜厚和孔与地接地间隔，而电路 2 比电路 1 有更大的过孔直径和焊盘。为减小过孔的电容性，通过背钻，移除了电路 2 中多余过孔长度，使电路 2 比电路 1 能更好的与 50Ω 形成良好匹配，如图 9 所示。对两个电路进行回波和插入损耗的测试得到，电路 2 就具有更宽带的回波损耗和稳定的插入损耗值。其中，电路 1 的带宽仅有约 12GHz，而电路 2 的带宽能达到 22GHz。按此思路，进一步对信号馈入过孔完善，可提高电路的工作带宽而应用于更高频率的毫米波电路中。

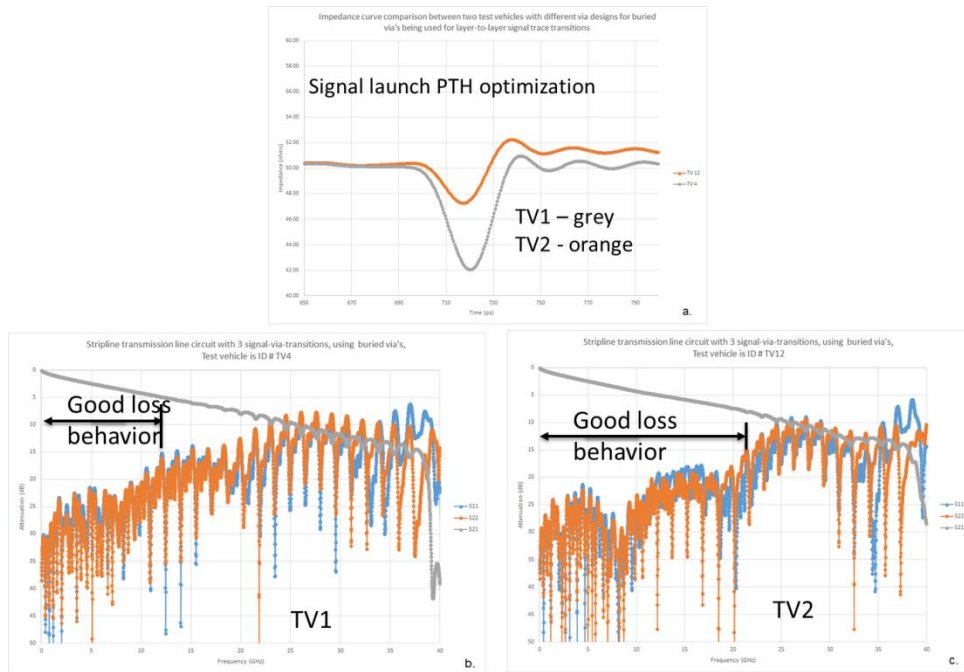


图 9 不同馈入信号过孔设计的带状线性能比较

5. 总结

综上所述，为使应用于高频毫米波频段的 PCB 平面传输线技术达到最优的电路性能，需要考虑 PCB 选材和设计等多个影响因素。在电路设计前的选材时，为控制电路色散或高次模的产生需要考虑较薄的 PCB 材料；为降低介质损耗，应选取较低的材料介质损耗；为降低导体损耗，应使用较光滑的铜箔等材料从而得到较好的电路传输性能。较窄的导体线宽容易增大加工难度、降低一致性，而不应选用高介电常数材料。在电路设计过程中，合理选择不同的传输线技术，以及良好的信号馈入设计可降低信号能量损失，减小信号反射，达到良好的馈入点匹配，从而进一步提升传输线电路在毫米波频段下的性能。

参考文献

- [1]. John Coonrod, "Signal Launch Methods for RF/Microwave PCBs", Microwave Journal, March 2014.
- [2]. Allen F. Horn, John W. Reynolds, and James C. Rautio, "Conductor Profile Effects on the Propagation Constant of Microstrip Transmission Lines," IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2010.
- [3]. John Coonrod, "Managing Circuit Materials at mmWave Frequencies," Microwave Journal, Vol. 58, No. 7, July 2015.
- [4]. David M. Pozar, "Microwave Engineering", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc.

[5]. M. D. Abouzahra, L. Lewin, "Radiation from microstrip discontinuities", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-27, pp. 722-723, Aug. 1979.

[6]. Wang, Taoyun, et al., "Quasi-static Analysis of a Microstrip Via Through a Hole in a Ground Plane," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-36, No. 6, June 1988, pp. 1007-1013.

[7]. Bill Rosas, "The Design and Test of Broadband Launches up to 50GHz on Thin and Thick Substrates," Southwest Microwave Inc., Tempe, AZ, 2011