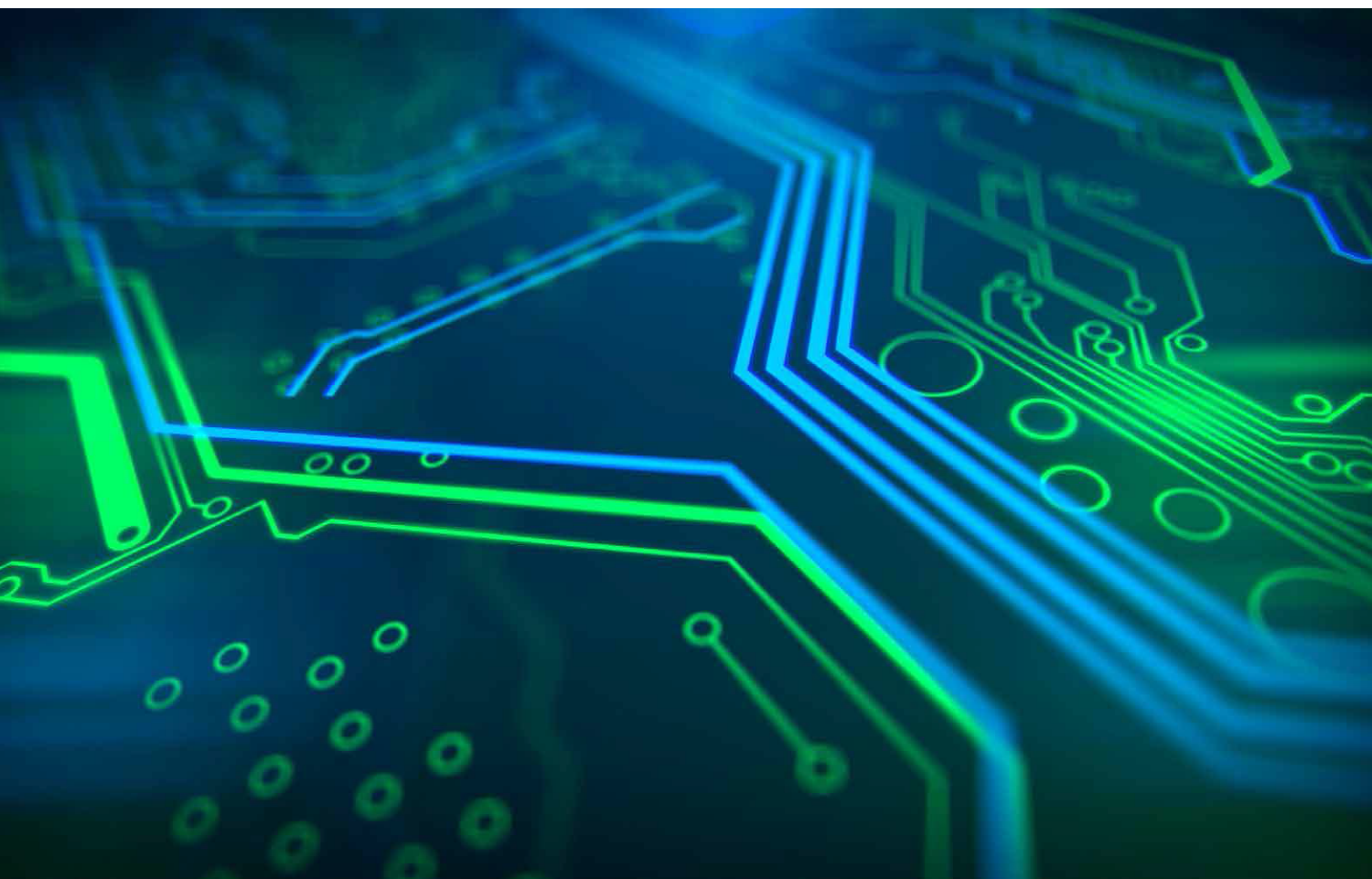


专题电子书

# 毫米波雷达应用的电路材料设计指南

2020年9月

赞助：



# 目录

理解温度变化对毫米波电路的 RF 性能影响-----	3
毫米波雷达的材料解决方案：从 ADAS 到智慧城市及智能工厂-----	13
线路板材料参数如何影响毫米波雷达的性能？-----	19
一种针对毫米波雷达天线应用而优化设计的PCB层压板-----	30

## 理解温度变化对毫米波电路的 RF 性能影响

罗杰斯公司, 亚利桑那州, 钱德勒市

温度的变化会导致高频电路性能的变化。不管这些温度变化是来自电路本身的内部散热, 或者是安装在电路上的设备, 又或者是来自于外界环境, 它们可能会对电路的性能产生影响。例如, 越来越多的汽车配备了基于毫米波电路的先进驾驶辅助系统 ADAS, 以避免发生碰撞。幸运的是, 表征电路材料特性的介电常数温度系数 TCDk 为设计人员提供了一种方法, 可让其了解材料的介电常数 Dk 相对介电常数或  $\epsilon_r$  随温度变化的关系。当电路板必须安装在温度变化很大的环境中, 例如在汽车电子产品或 5G 基站, 该参数可以用来预测电路材料在毫米波频率下的性能公差。

射频/微波印刷电路板(PCB)中的温度变化可能由多种因素引起。当电路从通电到断开的过程中, 电路的工作周期会发生温度变化, 从而导致性能变化。PCB 材料的厚度是需要考虑的这些因素之一。相比较而言, 较薄的 PCB 电路的 RF 性能对导体效应更为敏感。相反, 较厚电路对介质更为敏感。通常情况下, 导体效应影响高频电路的插入损耗, 而电路的介电特性会影响电路的相位响应等。无源元件如滤波器和功分器的插入损耗至关重要, 而相控阵天线则更关注于相位响应, 也就是 PCB 的介电特性。但也有例外的情况。

如图 1 所示, 插入损耗是介质损耗、导体损耗、辐射损耗和泄漏损耗四种损耗成分的总和。在此示例中, 泄漏损耗和辐射损耗已被忽略。对于大多数高频材料的 PCB 电路来说, 泄漏损耗通常不是问题, 因为这些材料具有非常高的体电阻率。尽管高功率应用可能会有例外, 本文这里先不做讨论。图 1 中也没有考虑辐射损耗。辐射损耗主要与电路设计有关, 许多变量会影响电路的辐射损耗。图 1 主要是帮助读者了解导体效应对薄电路和厚电路的影响。

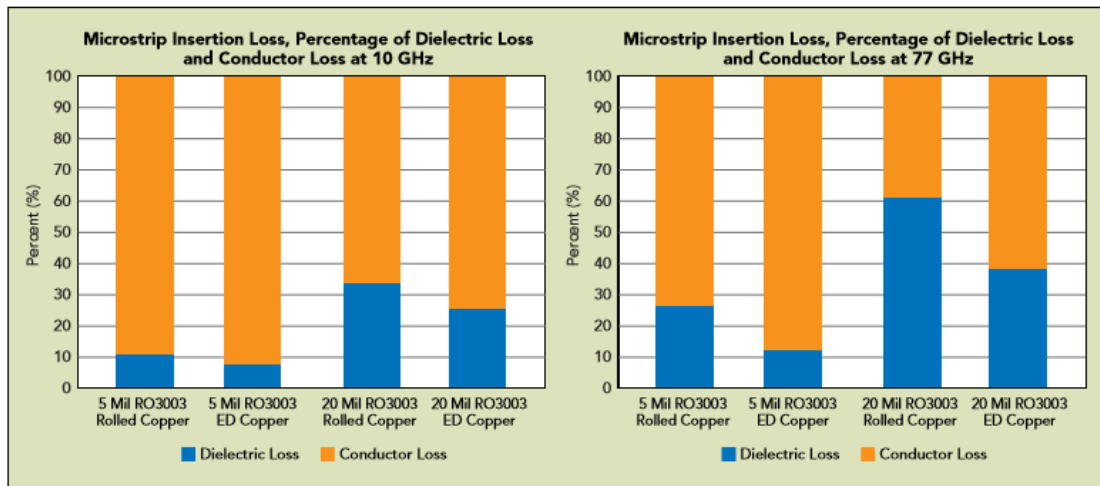


图 1 不同材料厚度的 50 欧姆微带传输线电路的插入损耗中介电损耗和导体损耗所占百分比。

可以看出，对于图 1 中的 50Ω 传输线电路，导体效应对于较薄电路的影响更为显著，反过来介电效应对于较厚电路影响更大。为什么需要了解这些呢？因为随着低频带宽的消耗以及越来越多毫米波电路应用，在毫米波频率下 PCB 更多使用薄的电路材料。此时，电路设计者应该关注导体效应，它包括是由铜表面粗糙度和导体的最终表面处理引起。

通常在较低的频率下使用较厚的电路材料：最小化导体效应，但介电效应增加。介电效应主要是指电路中的介质材料和任何非金属的耗散因子。其中的非金属的耗散因子是诸如在电路中添加的非金属的阻焊层和防护涂层，它们会影响介质损耗。图 1 比较了薄电路 (5mil 厚度) 和较厚电路 (20mil 厚度) 的损耗性能中各自所占不同损耗的比重差异。当然 20mil 在某些应用中并不被认为是厚的，但越厚电路介质损耗更占主导的作用。例如，对于 30mil 厚的电路，介质损耗将更加显著，而 60mil 厚的电路插入损耗将几乎以介质损耗为主。

理解基于电路材料厚度的变化对电路性能的影响让我们更好的了解在不同频率下 PCB 厚度的选择，而且也可以更好的理解 TCDk 对电路的潜在影响。理论上，较厚电路应该更容易受 TCDk 的影响，因为 TCDk 是一种介电特性。但是，由于电路在不同温度下工作时，其铜电导率也会略有变化，而这些变化也可能导致基于薄的射频电路比厚的射频电路性能变化更加明显。

尽管不同材料的配方不同，其由温度变化引起的 Dk 变化量可能有很大差异，但所有电路材

料都具有 TCDk 特性。图 2 介绍了几个不同配方体系的电路材料的 TCDk 变化曲线。

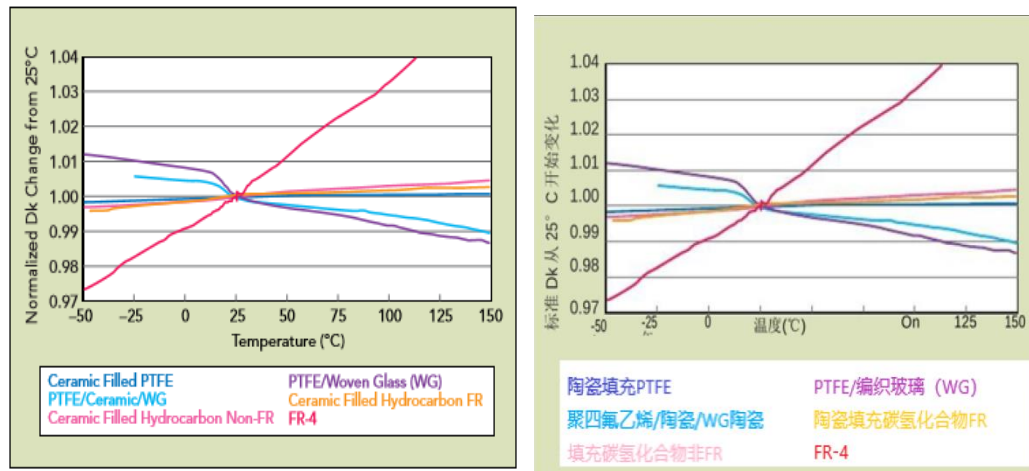


图 2.几种不同体系的电路材料的 TCDk 曲线

这些 TCDk 曲线的数据是通过测试原始 PCB 介质材料得到的，而非加工的电路。测试方法采用是 IPC-TM-650 2.5.5.5c 定义的 X 波段夹紧式带状线谐振器法，测试频率是 10GHz。我们评估了多种具有不同 TCDk 特性的 PCB 材料。其中棕色曲线是 FR-4 材料，其通常不被用于高频电路中。它的 TCDK 特性非常差，且 FR-4 的配方几乎也不具有良好的 TCDK 性能。紫色曲线显示在室温附近其 TCDk 有显著的变化，这是 PTFE 树脂的本质特性。这条曲线是仅仅是 PTFE 树脂和玻璃布增强的材料。但是，当陶瓷填料添加到配方中（浅蓝色曲线）时，室温下的 TCDk 变化就会大大降低。深蓝色曲线表明，并非所有的陶瓷填料都是相同的，理解陶瓷工程的复杂性可以有所作为的。这条深蓝色曲线正是诸如 RO3003™ 电路材料的 TCDk 曲线。RO3003™ 是一种陶瓷填充的、无玻璃布的 PTFE 材料，TCDK 为 -3ppm/°C。由于特殊的陶瓷填料，室温下的 TCDk 无明显变化。理想情况下 TCDk 应该是 0ppm/°C，即 Dk 不随温度的变化而变化。作为数字参考，TCDk 小于 |50|ppm/°C 或更低可认为较好。之所以使用绝对值是因为一些材料的 TCDK 具有负斜率趋势，一些材料具有正 TCDK 斜率。作为参考，品红色曲线的 TCDK 为 50ppm/°C。尽管图 2 所示的图表有助于理解材料的 TCDK 性能，但由于该测试方法的原因，它仍然具有多方面局限性。一方面是测试频率受到限制，另一方面是测试未使用实际电路。罗杰斯公司

开发了一种测试方法，可以评估不同温度下的电路 Dk 变化，被称为电路 TCDK 测试法。它通过使用特殊装置的微带差分长度法去评估某一温度下的电路特性。

电路 TCDk 测试方法如下：在被评估的材料上制作两个 50Ω 微带传输线路电路，除了物理长度外其它都是相同的。一个电路是 2 英寸，另一个是 8 英寸。首先将电路放在加热装置上，此时并不加热而使其处于室温，测试初始室温下的射频性能。获取初始室温数据后，打开加热块并把温度调整到某一温度，如 65°C。当电路达到这个温度仍保持一段时间以确保达到温度的热平衡，可通过安装在电路旁的热电偶和 FLIR® 热成像摄像机对其进行监视。电路在该温度下稳定后，就可以进行测试扫描并捕获数据了。接下来，继续调整加热装置使温度升高，比如 125°C，再次达到热平衡后继续测试并收集数据。2 英寸的电路和 8 英寸电路均通过相同的步骤进行测试。本文并不涵盖这种测试方法的许多细节，如果需要详细信息请联系罗杰斯公司。

罗杰斯公司评估了多种不同材料的电路 TCDk 特性，但这里仅就其中两种材料的比较作为电路 TCDk 的介绍。为了更好的了解 TCDk 对电路性能的影响，分别对较差的 TCDk 和较好的 TCDK 性能材料进行比较。通过评估不同基板厚度和不同铜类型的材料，可以了解 TCDk 对射频性能的影响是否因基片厚度或铜类型的不同而有所不同。

## 测试

本次选用的材料为 RT/Duroid®5880 和 RO3003™ 层压板。RT/Duroid5880 材料作为市场上推出的损耗最低的电路材料之一，有着良好的、悠久的历史，尽管它有着 -125 ppm/°C 的差的 TCDk。RO3003 材料已经应用于不同领域多年，并且已经成为了 77GHz 汽车雷达传感器的首选材料。RO3003 材料的 TCDk 为 -3ppm/°C。本次研究的 PCB 板厚度选用 5mil 和 10mil，使用的压延铜和标准电解铜箔。压延铜的平均表面粗糙度为 0.35μm RMS，而标

准电解铜的平均表面粗糙度为 2.0 $\mu$ m RMS。

图 3 给出了在使用 5mil RT/duroid 5880®层压板，采用压延铜和标准电解铜制成的电路的 TCDk 测试结果

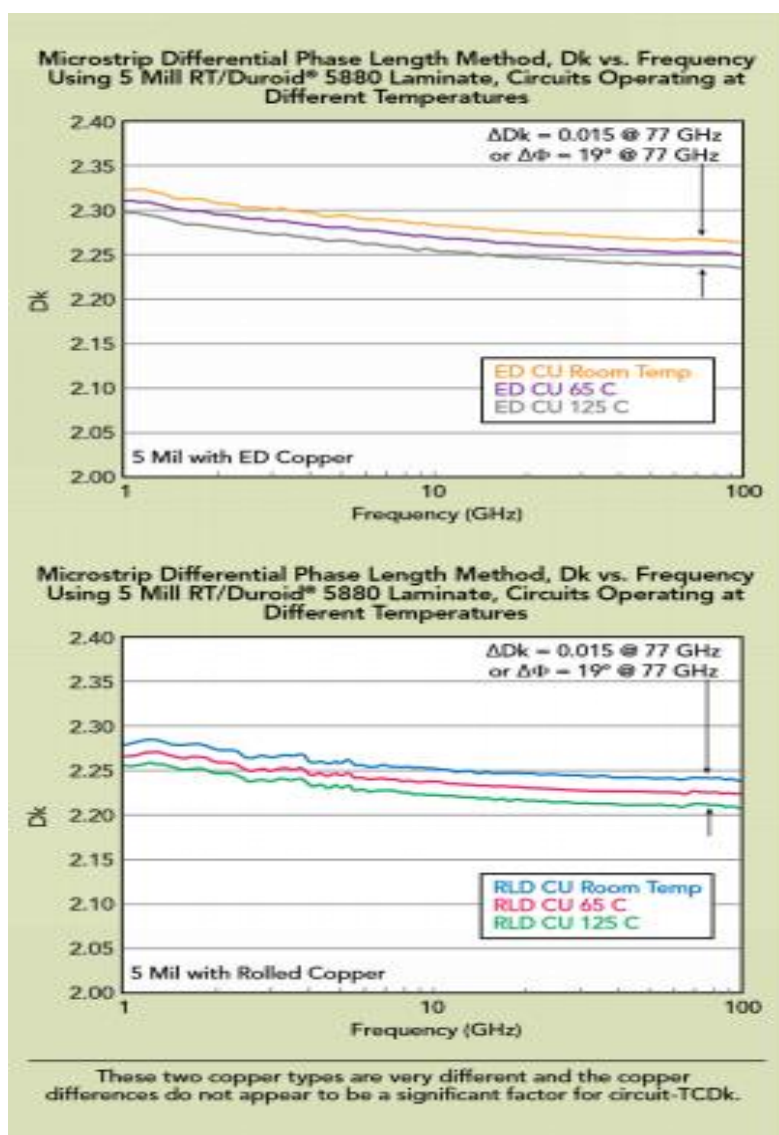


图 3 比较了不同温度下，略差 TCDk 的介质材料采用不同铜箔类型的电路 TCDk

图 3 显示在不同的温度下，铜箔类型几乎不会引起电路 TCDk 性能差异。实际这两种铜箔的晶体结构非常不同，导电率非常相似，但是不同温度变化引起的导电率的差异似乎并不明显。需要注意，这里比较的基于该材料两种不同铜箔类型的电路时，得到的 Dk 的偏移（即图表 y 轴上的数据）是属于正常偏移。电磁波在粗糙的标准电解铜会比光滑的压延铜中的传播更



慢，而对应的相速较慢会导致有效介电常数和最终得到的材料 Dk 增大。罗杰斯公司称最终得到的材料的 Dk 为设计 Dk。

为了继续进行有关 TCDk 的研究，仍使用相同材料同类型铜箔，但不同厚度，去评估温度对不同厚度的电路材料 TCDk 的影响。图 4 是 77 GHz 下测量评估的结果。

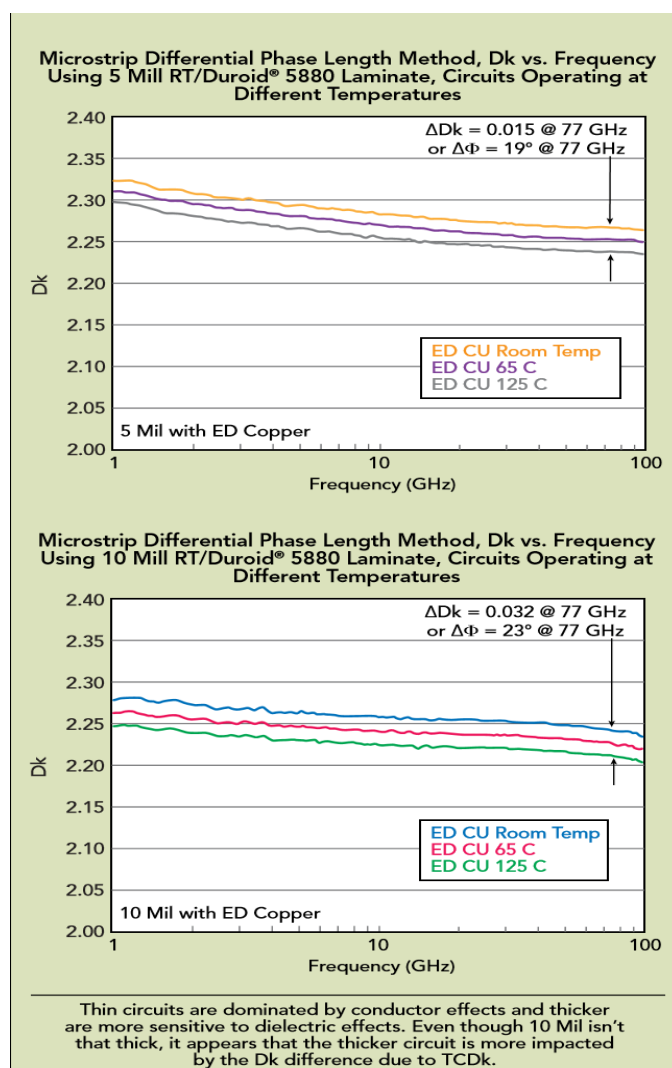


图 4 比较了不同温度下，具有略差 TCDk 的相同材料、相同铜箔，但不同厚度的电路 TCDk

如图 4 所示，电路 TCDk 的变化差异与材料厚度相关。与较薄电路相比，较厚电路的设计 Dk 随温度变化差异更大。在不同的工作温度下，由于材料的 TCDk 而引起的 Dk 的变化表明，较厚电路材料对介质性能的影响要大于对导体性能的影响。

图 5 显示了使用具有较好 TCDk 性能的材料进行电路 TCDk 测试的结果。如图 所示，使用具有较好 TCDK 材料，不同铜箔类型的电路的 Dk 随温度变化上几乎没有差异。图 3 也显示



了在使用较差 TCDk 的材料时，不同铜箔类型不会影响电路的 TCDk。通过比较，很明显看到使用较好 TCDk 性能材料的电路 Dk 或相角的随温度的变化差异最小，而使用较差的 TCDk 性能材料的电路随温度变化就大很多。

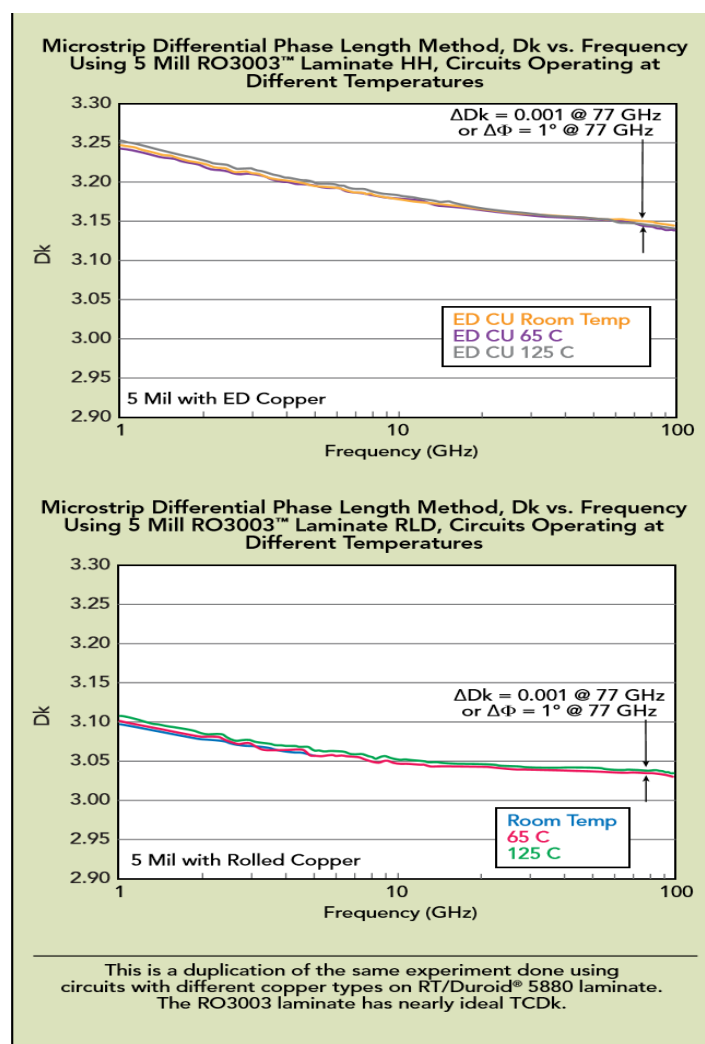


图 5 比较了不同温度下具有较好 TCDk 的相同厚度材料，采用不同铜箔类型的电路 TCDk

另一个与温度有关的介质材料特性，即介质损耗温度系数(TCDf)，也可能受到电路材料的相对厚度的影响。但由于常规测试方法的局限性，该 TCDf 很难准确测量。例如，诸如 IPC 夹紧式带状线谐振器测试方法就对组成测试夹具的金属非常敏感。当金属在不同的温度下膨胀和收缩时，这就导致了测试方法的不准确性。另一个方面，通过这种测试方法提取 Df 时，也存在测试样品的类型以及不同类型对温度变化引起的物理尺寸的敏感变化的问题。而且，测试方法中谐振片的导体由于温度变化引起的电导率也会发生变化。尽管铜导体电导率的变

化非常微小 (可能一个很小的值), 但是考虑到 Df 的计算提取过程中材料介质损耗以及其它损耗 (导体损耗和辐射损耗) 本身就非常敏感的特性, 那么由于温度变化引起的铜导体电导率的微小变化也会导致 Df 提取准确度问题。

更为现实的方法可以通过测试电路在不同温度条件下的插入损耗来评估材料由于温度产生的损耗变化。作为电路 TCDk 实验的一部分, 对电路的其它性能也进行了评估。与 Dk 变化相关的电路其他特性, 如相位响应和阻抗, 与 Dk 随温度的变化趋势是非常相似的。当然, 电路的插入损耗, 特别是不同温度下的插入损耗也进行了测试。图 6 比较了 5-mil RT/duroid®5880 层压板材料使用不同类型铜箔时的电路的插入损耗随温度的变化情况。图中曲线所表示的电路插入损耗随温度变化的测试是与电路 TCDk 的测试所使用的被测电路相同, 且同时收集了数据。

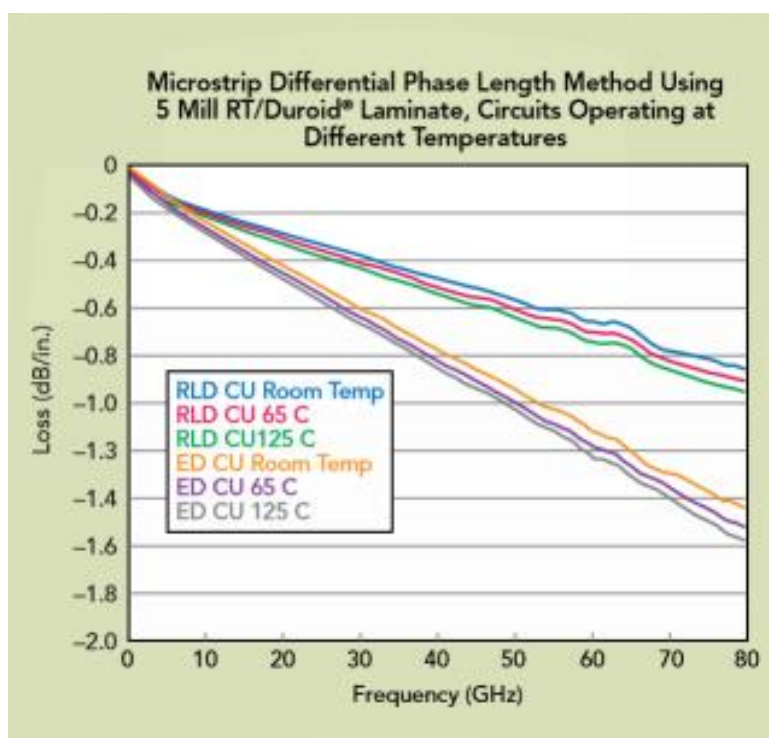


图 6 比较了使用 5mil RT/duroid® 5880 层压板的两种不同类型铜箔的电路在不同温度下的插入损耗变化。如图 6 所示, 铜箔表面粗糙度对这些电路的损耗影响是非常明显的。压延铜具有非常光滑的铜箔表面, 对导体损耗的影响较小, 从而对插入损耗的影响也很小; 而铜箔表面粗糙的标准

电解铜对损耗的影响较大。在 5mil RO3003™ 层压板上测试的损耗趋势类似于图 6 所示的结果，这里先不做讨论。进行不同温度下插入损耗测试主要是比较较差 TCDk 材料和较好的 TCDk 材料，看是否较差的 TCDk 材料它的 TCDf 较差，或随温度变化的 Df 变化很大；而较好的也较好。不幸的是，由于这些材料(RT/duroid® 5880 和 RO3003™ 层压板)具有非常低的损耗因子(Df 0.001 或更低)，电路损耗随温度和频率变化而变化并不明显。

使用更高损耗的材料进行的类似比较，它们分别具有较好和较差 TCDk，期望能够得到较差 TCDk 的材料也将具有较差 TCDf。然而，这个实验更为复杂，因为不同的材料配比随温度变化而表现出不同结果。基于 PTFE 材料的可能与大多数基于烃的材料有很大不同。而且，不同的 PTFE 材料的性能可能会因所使用的填料不同、以及用于层压板的玻璃布类型或玻璃布的用量不同而有所差异。

总而言之，所有的电路材料都具有 TCDk 的固有属性，它是任何可能处于不同温度环境下的应用电路在设计阶段都应考虑的重要参数。电路板的厚度会影响电路的性能。随着温度的变化，较厚材料的电路可能会因为材料 TCDk 参数使 Dk 变化更大。在研究中由于受到铜箔类型少的限制，铜箔引起的差异似乎并不明显影响 TCDk 电路性能。此外，如图 3、4 和 5 所示，电路材料的 TCDk 与频率无关。尽管可能看到很小的差异，但是从 10GHz 至 77 GHz 范围内 Dk 偏移量大致相同。数据手册中的 TCDk 值通常在 10GHz 下进行测试的，而且是用于没有铜箔的纯介质材料。当考虑电路形式的 TCDk 效应时，可以看到材料的厚度会影响 TCDk 且对电路性能的影响。这表明，当设计人员进行电路仿真时，应根据原始介质材料的 Dk 在温度范围内可能发生的变化，多尝试采用不同 Dk 值进行仿真。以便更好地了解 Dk 的温度变化对电路的影响。

## 参考文献

1. John W. Reynolds, P.A. LaFrance, J.C. Rautio and Al F. Horn III, "Effect of the Conductor Profile on the Insertion Loss, Propagation Constant, and Dispersion in Thin High Frequency Transmission Lines," DesignCon 2010.
2. John Coonrod, "Insertion Loss Performance Differences Due to Plated Finish and Different Circuit Structures," APEX / IPC Expo 2019, Feb. 2019.
3. John Coonrod, "Characterizing Circuit Materials at Millimeter-Wave Frequencies," Microwave Journal, Vol. 62. No.5, May 2019.

The reference to the FLIR thermal imaging camera was from FLIR Systems, Inc.

## 毫米波雷达的材料解决方案：从 ADAS 到智慧城市及智能工厂

罗杰斯公司，亚利桑那州，钱德勒市

在过去的 20 多年间，雷达技术被广泛应用于汽车行业，这些技术使得驾驶更安全、更便捷。

随着工业 4.0 以及智慧城市的发展，雷达系统在交通管理、安防、楼宇自动化等方面的应用更加多样化。随着雷达 PCB 应用领域的不断发展和完善，罗杰斯公司的射频材料解决方案在高性能、高可靠性、高性价比等方面已经成为了行业的开拓者。



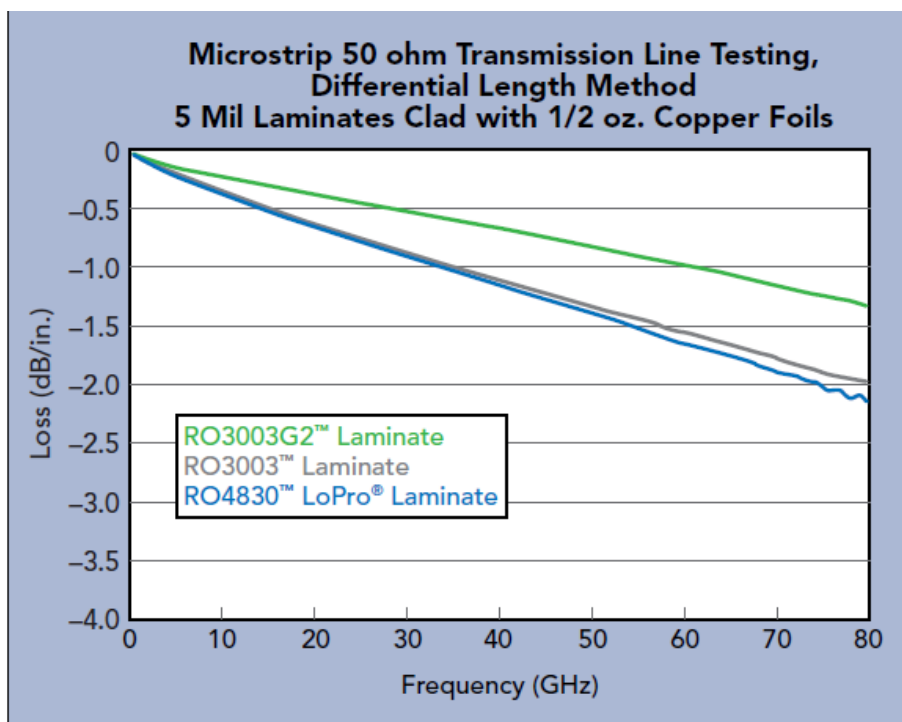
### 适用于 ADAS 和自动驾驶的雷达传感器

如今，雷达传感器已成为高级驾驶辅助系统 (ADAS) 的关键组成部分。随着 ADAS 的发展，为满足监管和 NCAP 规划路线图对安全功能日益增长的要求，雷达技术也被广泛应用到其它领域中，例如：用于摩托车和行人检测的角雷达，以及用于减少中暑悲剧发生的舱内生命体征探测雷达。此外，高分辨率雷达技术正在开发和部署在 L4 和 L5 级自动驾驶汽车中，用于个人出行以及最后一英里的物流配送。雷达技术有望发展并满足这些汽车应用日益增长的性能要求。

长期以来，罗杰斯公司的高频层压板提供了 PCB 贴片天线所需的射频性能和高可靠性，为这些天线应用于汽车雷达提供了关键性的安全保障。其中，RO4000®系列材料（例如 RO4835™层压板）广泛用于 24 GHz 的应用。对于 77/79 GHz 的汽车雷达应用，RO3003™层压板由于拥有优异的射频性能和热机械性能，而处于行业领先地位。为了满足汽车雷达天

线设计工程师提出的更高要求，罗杰斯持续投入研发，并不断推出新产品，使得汽车雷达设计工程师、雷达芯片组供应商、PCB 制造商，能进一步优化其汽车雷达应用的成本和性能。

与第一代 RO3003 层压板相比，新一代 RO3003G2™层压板具有更低的插入损耗，更稳定的介电常数以及更优的 PCB 制造性能。罗杰斯 RO4830™层压板采用了 LoPro®铜箔，在射频性能和成本之间实现了平衡。RO4830 热固性层压板是一款十分具有竞争力的射频层压板材料，它在降低 PCB 制造成本的同时，还具有类似 RO3003 层压板的低插入损耗，它的另一个优点是即使长期工作于室外环境中，也具有稳定的介电常数。



微带线 50 ohm 传输线测试，1/2oz.铜箔的 5 mil 层压板插入损耗对比（差分相位长度法测得）



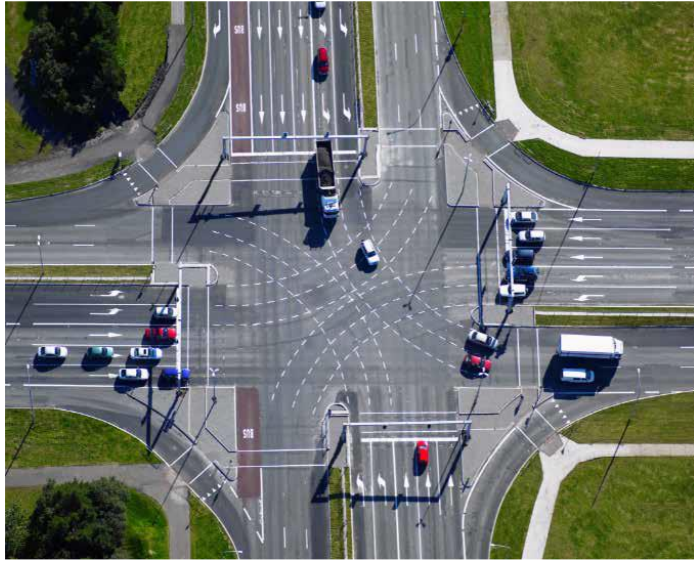
### 适用于智慧城市和工业 4.0 的雷达技术

现在，我们可以看到这些类似的雷达技术，正在应用于自动驾驶汽车，应用于创建智慧城市和智能工厂，用于提高人们的效率和生活质量。在全球范围内，有超过 42 亿人居住在城市地区。联合国预计，到 2050 年，居住在人口稠密的城市地区的人口将增长到 68%，特别是特大城市的人口聚集态势还在不增加。高人口密度有利于城市经济的蓬勃发展，能带来更高的效率和生产力，能为市民和企业创造机会。最大限度地利用城市的道路基础设施、电力、建筑和社会服务，能为城市居民创造一个安全、清洁的生活环境。

在智慧城市中，数字传感器（尤其是雷达）将成为城市的眼睛和耳朵。这些传感器能够最大化提高城市交通的运营效率，让人们在最短的时间内到达公司。同时，减少交通拥堵，也可以最大程度利用现有的道路基础设施，增加城市道路的通行效率。

此外，在楼宇或智慧家庭中，雷达传感器可以自动调整供暖、通风和空调（HVAC）系统，控制照明、门窗的开启，最大程度地减少用电量。让人们在舒适性、成本和能耗三者之间实现完美平衡。在自动化办公室系统中，雷达可以实时提供在岗员工的相关数据，这些关键数据可以用来优化建筑和空间的利用率。在智能工厂中，雷达传感器可以在安全可靠的情况下，通过预测安全和健康状态，辅助人们管理操作机器人系统。





在智慧城市中，交通管理系统也在采用雷达传感器来监测车辆实时通行情况，系统可以获取到包括行人、自行车等所有道路运动目标的队列、速度、位置等信息。雷达系统不受天气影响，可以全天候提供稳定可靠的数据，协助调整交通状况和交通信号灯，节省人们的出行时间。当有交通事故发生时，交通管理系统需要迅速做出反应，以防止发生危险情况并减少交通拥堵造成的延误。这时候，雷达系统就能体现出其优势，它会在事故第一时间做出响应，控制摄像头放大事故区域，来协助分析交通情况。另外，通过对所有传感器数据的综合分析，利用 5G 高速信号传输，以及车辆与基础设施通信相结合，还可以完成对交通状况的提前预测。

雷达技术在性能和成本上均优于其它交通传感器。雷达几乎可以在所有天气条件下有效运行，并且其测量精度比传导方式更高。雷达传感器不是侵入式的，这使得道路维护人员可以方便地使用它们，从而降低系统成本。与汽车 ADAS 类似，交通管制中的雷达也需要采用高性能的 PCB 天线，用来实现发射和接收信号。这些 PCB 天线必须具备较高的角分辨率、侧向分辨率、可重复等性能。这就要求罗杰斯的线路板材料能够胜任这么高的频率，并且能在如此苛刻的工作环境下保持优异的性能。

PCB 天线的核心指标参数包括：增益、方向性、效率等。线路板材料的低损耗对于实现良好

的天线性能至关重要。这些紧凑型天线及其高频发射、接收电路在应用于智慧城市及智能工厂时，必须能保证连续可靠地运行。



在智能工厂中，第四次工业革命已经开始。工业 4.0 是一个万物互联的智能时代：无处不在的云计算、人工智能、增材制造、机器人协同工作、无人机、区块链以及混合现实。像雷达这样的传感器最适合用来获取相关数据，这些数据将为快速改进产品的质量，提高设备的利用率，预测安全性以及降低环境影响等方面提供决策支持。产品也将通过物联网(IoT)变得更加智能，将数据传输给企业，在产品生命周期内进行实时改进，为客户提供更多额外价值。在这些严格的产品和生产环境中，配备 GPS 定位和 Wi-Fi 快速数据传输的雷达装置将广泛应用于判断物体是否存在，测量其速度和距离等多种应用中。

无论是在 24 GHz，60 GHz 还是 77/79 GHz 频率，PCB 天线的性能对于这些应用都至关重要。作为汽车雷达市场中射频材料的市场领导者，罗杰斯已准备好为行业提供易用的材料解决方案。为智慧城市的每个雷达案例量身定制天线系统，提供最佳和最可靠的射频材料。来自罗杰斯公司的 RO4835 层压板是可靠的 24GHz 雷达电路材料，适用于交通管理、工厂、建筑和家庭自动化应用，如闸门、自动照明及空调系统等。

当我们逐步使用更高的频率以实现更高的分辨率，实现对目标的分类，以及运动检测和人数统计等应用时，电路的尺寸会随着频率的增加而缩小。在 60GHz 至 77/79 GHz 的工作频率下，这些信号的波长会变得非常小。在这些频率下需要使用各种不同类型的传输线电路，包

括：微带线、带状线、共面波导（CPWG）等。这些优良的电路特性需要极其一致且可预测的线路板材料，例如：RO3003G2™和 RO4830™层压板。罗杰斯 RO4830 热固性层压板非常适合对价格敏感的毫米波应用。罗杰斯 RO3003G2 层压板是一款具有更低插入损耗和更低介电常数变化的产品，能够在整块电路板以及各种复杂的使用环境中保持稳定的介电常数，特别适用于对微弱信号需要具有较高灵敏度的毫米波电路。



雷达传感器具有成本效益高、用途广泛、全天候工作等多方面优点，在保障社交的安全性和机动性等方面发挥了重要作用。其通用性也非常适合家庭、办公室、工业生产等应用场合，可以提高这些场合的安全、安防等级及运行效率。随着雷达传感器的普及，罗杰斯公司将不断提供高性能、高性价比的材料解决方案，持续保持创新并引领市场。

## 线路板材料参数如何影响毫米波雷达的性能？

罗杰斯公司，钱德勒，亚利桑那州

毫米波 (mmWave) 频率段能够为许多应用提供大带宽。为了充分利用带宽优势，当前主流射频电路的工作频率要比传统无线通信的工作频率高得多，并且频率范围大多集中在 24 至 77GHz 范围，甚至更高。典型应用领域从“5G 蜂窝无线网络”到“高级驾驶辅助系统中的防撞雷达 (ADAS)”。这些频率曾经一度是军方专用，那时毫米波电路的研发成本和研发难度均让民用领域望而止步。但随着材料、电路等领域关键技术的突破，成千上万的毫米波应用如雨后春笋般在 77GHz 汽车雷达系统中普及，这些雷达和自动驾驶技术使得道路出行更加安全。为保证毫米波雷达系统的最优工作状态，如何选择最适合的印刷电路板 (PCB) 材料就成为毫米波电路设计过程中最关键的一个步骤。

对于大多数射频电路工程师来说，工作于毫米波频率下的电路存在太多的不确定因素，首先面临的一个难题就是如何选择适合的 PCB 线路板材料。但是，如果能充分了解各种线路板材料的指标参数，并且知道这些参数会对毫米波电路产生哪些影响，那么就可以轻而易举地寻找出适合 77GHz (或其它毫米波频率) 的线路层压板。简而言之，材料性能的一致性比什么都重要。能够在各种温度、各种工作环境中不受时间影响，并且能长时间保持性能稳定的低损耗、高性能线路板材料，就是设计毫米波电路的最佳材料。

设计毫米波频率下的 PCB 传输线，无论是微带线、带状线还是接地共面波导 (GCPW)，其尺寸和特性都必须是十分精准的。信号的波长随着频率的增加而减小，因此频率越高，对传输线的精度要求也就越高。毫米波频率下传输线的性能，将受到线路板材料性能的限制，如果 PCB 线路板材料上各个区域的性能无法保证一致性，那么就会导致其加工出来的传输线出现信号损耗、相位偏移、传播延迟等诸多问题。对于那些对时序和信号相位十分敏感的雷达系统，延迟和相位失真会降低系统的最终性能。通过更详细地了解线路板材料

的指标参数会对毫米波电路产生什么样的影响，就可以更加方便地选择适合各种不同类型毫米波电路（包括 77GHz 汽车雷达系统和第五代（5G）蜂窝无线通信系统）的 PCB 材料。

在筛选满足电路设计要求的线路板材料时，工程师通常会先考虑自己比较熟悉的材料参数，如介电常数（Dk）和耗散因子（Df）等。其中，Dk 是用于表征线路板材料电磁

（EM）电荷存储能力的指标，而 Df 是用于表征线路板材料能量损耗的指标。相对于其表面的金属导体来说，PCB 的电介质材料可以认为是绝缘体。并且电磁信号会沿着导体传播，同时部分信号会进入介质材料中，另一部分信号会向周围空间辐射。对于表面覆铜的线路板材料，较低的 Dk 值可以实现信号的较快传播，同时信号也具有最低的延迟和最小的相位变化，这些特性对毫米波电路来说是非常重要的。

Dk 值通常用线路板材料的厚度方向或 z 轴方向的测量值来表征。其数值根据 IPC

（www.ipc.org）等组织制定的，并且被行业公认认可的标准来确定，通常会在某一个确定的频率（例如 10 GHz）下来描述它。随着频率或温度的变化，每种电路材料的 Dk， $\Delta Dk$  都会有一定程度的变化，这些变化都会对电路的性能产生影响。

Dk 值通常与线路板介质层材料的成分（如 PTFE）有关。但是，决定线路板性能的 Dk 值是一个复合值，它由介质材料中使用的填料（如玻璃纤维增强材料）、材料厚度、甚至铜导体的质量等多个因素共同确定。为了方便电路设计和计算机仿真建模，Dk 的实际值要比其标称 Dk 值更重要，因为实际 Dk 值不但决定了线路上电路的尺寸，还会影响这些电路的性能，它通常被称为“电路感知 Dk 值”或罗杰斯公司称之为“设计 Dk 值”。

### 电介质对 Dk 的影响

在设计适合于毫米波电路（例如 77GHz 汽车防撞雷达）的线路板材料时，Dk 是众多需要



考虑的参数之一， $D_k$  的变化应最大可能地控制在接近其标称值的范围内。另外，能影响毫米波电路性能的其他材料参数还包括： $D_f$ 、材料厚度、铜导体质量、吸湿性以及玻璃纤维增强引起的“玻璃编织”效应。再次需要强调的是，一致性是必不可少的，尤其是在毫米波频率下，这些参数的剧烈变化也会影响毫米波频率下的电路性能。

这些不同的电路参数都会影响线路板材料的“设计  $D_k$ ”值。为了确保对  $D_k$  的描述清晰且无歧义，这里的“有效  $D_k$ ”是指信号在传播过程中产生的总  $D_k$  值。对于微带线来说“有效  $D_k$ ”是指介质中的  $D_k$  以及介质周围空气中的  $D_k$  共同作用下的复合值。“设计  $D_k$ ”是在“有效  $D_k$ ”基础上只考虑材料本身的  $D_k$  值，即消除了周围的空气对  $D_k$  的影响之后得到的值。

使用罗杰斯公司厚度为 5mil，表面铜箔为电解（ED）铜的 RO3003™ 线路板材料加工而成的微带线，在 77GHz 频率下测试得到其“有效  $D_k$ ”（包括空气影响）值为 2.54，其“设计  $D_k$ ”值为 3.16。对比几个不同的  $D_k$  值，可以看到，原材料在厚度方向或  $z$  轴方向上的  $D_k$  值为 3.00，这个值是在没有电路因素影响的情况下，直接对原材料采用标准化测试得到的值。“原材料  $D_k$ ”代表了材料的特性，是介质材料的固有  $D_k$ 。然而，“有效  $D_k$ ”和“设计  $D_k$ ”是用于表征电路性质的  $D_k$ 。

例如，材料的“设计  $D_k$ ”（以电路形式测试得到的材料  $D_k$ ）会随材料厚度的变化而变化。

“设计  $D_k$ ”随材料厚度变化的同时，通常还会受工作频率的影响， $D_k$  随频率增加会降低。

因此，对于电路设计工程师来说，在利用计算机仿真软件设计毫米波传输线时， $D_k$  的这些变化会带来一定的阻抗误差。

如果微带电路采用了比较薄的线路层压板，那么顶层的信号导体面和底层的接地面之间的距离必然会很小。相对于介质原材料的  $D_k$ ，线路层压板越薄，用其加工出来的电路就越容易受到导体层的影响，在这种情况下，“有效  $D_k$ ”和“设计  $D_k$ ”值受导体层的影响更大。对于较薄基板上的传输线“设计  $D_k$ ”值增加，其电容增加，同时阻抗会降低；反之，对于较厚的基板

上的传输线“设计 Dk”值减小，电容减小同时阻抗会增加。另外，使用较宽的传输线也可以间接达到增加电容的目的，但这会增加 PCB 上导体的面积。

对于许多高频应用，包括 77GHz 雷达，传输线的阻抗在各个位置均要保持一致，这样才能尽可能地减少信号反射。如果传输线偏离了 50Ω 特征阻抗，就会导致信号出现反射、损耗和相移。对于给定的 Dk 变化范围，这些偏移在毫米波频率下对相位产生的影响要比低频频率大得多，并且会成为毫米波频率下雷达性能下降的主要原因。

毫米波电路通常会使用比较薄的 PCB 材料，而且大多数情况下是同时包含模拟电路、数字电路和电源的多层电路。对于相同型号的材料，随着厚度增加“有效 Dk”和“设计 Dk”的值将会减小。以罗杰斯公司的 RO4350B™ 线路板材料为例，频率为 8-40GHz 时，在 6.6mil 厚度下，材料厚度方向或 z 轴方向的 Dk 平均值为 3.96；但在 30mil 厚度下，“设计 Dk”值降为 3.68（如图 1 所示）。可以看到，随着厚度的增加“设计 Dk”会减小；当材料厚度达到 60mil 时，“设计 Dk”值会降低至 3.66。当然，“设计 Dk”也不会因为厚度持续增加而无限降低，当厚度增加到一定程度时 Dk 值会趋于稳定，这时候的“有效 Dk”和“设计 Dk”主要由线路板中的介质材料来决定，表面导体对 Dk 的影响随着材料厚度的增加可以忽略不计。

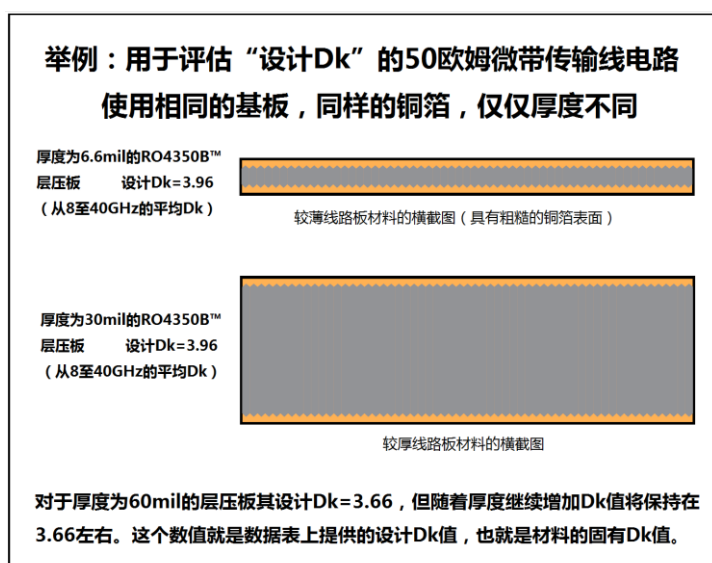


图 1 不同厚度和铜导体粗糙度对介电常数的影响



为了进一步说明材料厚度对电路设计的影响，采用另一种线路板材料进行同样的实验。选择罗杰斯公司的 RO3003 线路板材料，分别采用 5mil, 10mil 和 20mil 三个不同的厚度，材料具有相同类型表面铜箔（ $\frac{1}{2}$ 盎司的 ED 铜），基于 50 $\Omega$ 微带传输线的差分相位法，进行“设计 Dk”值的测试。在 50GHz 频率范围内，测试结果表明，“设计 Dk”会随线路板厚度变化而变化（具体如图 2 所示）。

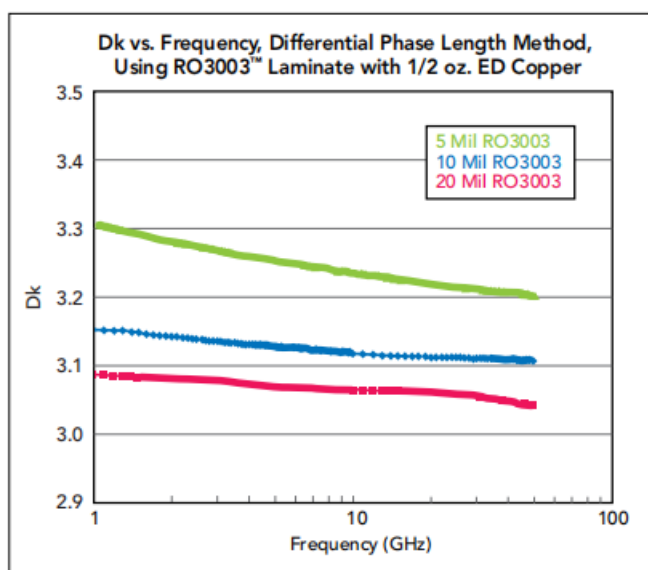


图 2 以 RO3003 层压板为例，材料厚度对设计 Dk 值的影响

### 铜箔对 Dk 的影响

线路板材料的所有组成元素都会影响“设计 Dk”，所以要全面考虑所有构成线路板元素的指标参数。例如：铜导体的质量可能会影响电路在毫米波频率下的性能。高质量的铜导体可以为传输线提供高导电性和高一致性的阻抗，这些特性是保障信号在毫米波频率下维持相位稳定的关键因素，例如应用在 77GHz 汽车雷达中。

线路板材料的铜箔表面粗糙度会在一定程度上影响毫米波电路的性能。通过表面粗糙铜箔加工出来的传输线，其表面电磁波的传播速度要慢于采用同类型铜箔但表面更光滑的传输线。

这里所谓的铜表面粗糙度是指：在基板与铜箔接触的这个平面上铜的粗糙度。较慢的电磁波

传播速度等效于线路板材料具有较高的 Dk。

为了进一步说明铜箔表面粗糙度的差异是如何影响毫米波电路性能的，将 4mil 厚的液晶聚合物 (LCP) 作为电介质，与不同的铜导体组合在一起。铜导体由不同类型的 ED 铜组成，每种 ED 铜具有不同的表面粗糙度。表面粗糙度采用均方根 (RMS) 值来衡量，组合的铜导体 RMS 值分别为 0.5、0.7、1.5 和 3.0 $\mu\text{m}$ 。

为了评估不同铜导体对材料 Dk 的影响，在上述四种不同粗糙度的 LCP 基板上加工出 50 $\Omega$  微带传输线，使用微波/毫米波矢量网络分析仪 (VNA)，在 8 到 50GHz 频段内进行测试。

结果表明“有效 Dk”值会根据铜导体的类型而变化，但各自在整个频率范围内几乎保持恒定 (如图 3 所示)。

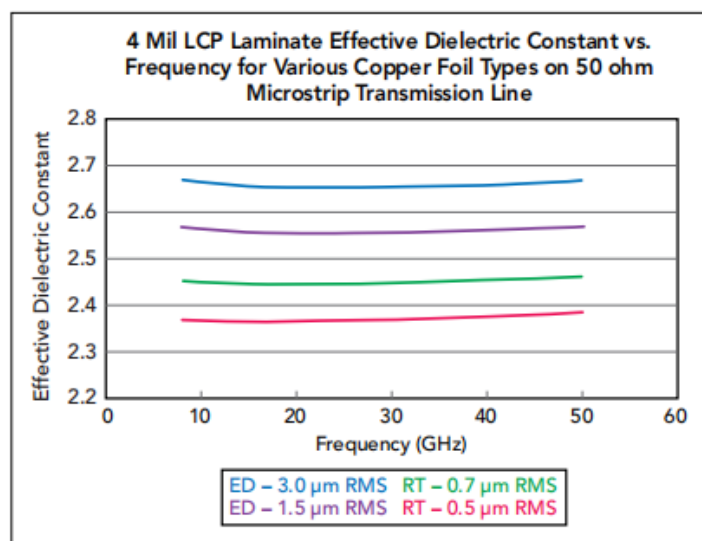


图 3 线路板材料的有效 Dk 随着铜导体类型及表面粗糙度而变化

正如测量结果所示，使用不同类型铜导体的相同 PCB 材料会产生不同的“有效 Dk”值。在采用完全相同的介质材料情况下，使用粗糙铜箔表面材料的电路比光滑铜箔表面电路具有更高的“有效 Dk”值。而且可以看到，具有更高有效 Dk 电路的“慢波效益”在更高频率下影响会更大一些。

另外，铜箔表面粗糙度也会影响导体损耗，特别是在毫米波频率下，粗糙的铜导体表面会导致更高的导体损耗。为了验证这个结论，用同样 5mil 厚的 RO3003 层压板，分别采用 ED

铜和压延铜进行测试，其中 ED 铜的 RMS 表面粗糙度为  $2.0\mu\text{m}$ ，而压延铜的 RMS 表面粗糙度为  $0.35\mu\text{m}$ 。

实验测量了  $50\Omega$  微带传输线从直流到  $110\text{GHz}$  的插入损耗，用于比较不同铜导体的损耗特性。铜表面粗糙度（增加）对导体损耗、插入损耗的影响是显而易见的（如图 4 所示）。线路板材料的厚度也会对铜表面粗糙造成的损耗产生影响，材料越薄受铜箔粗糙的影响就越大。

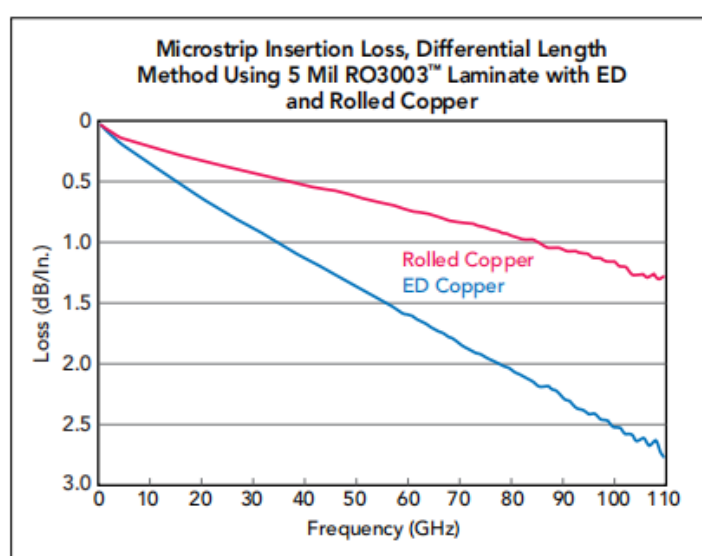


图 4 不同的铜导体类型会影响电路的损耗性能。

### 如何保持 Dk 稳定

工作于  $77\text{GHz}$  的车载雷达能够检测到反射信号相位的微小差异，线路板材料“设计 Dk”的任何变化都会影响到相位状态，从而降低系统的探测精度。理想情况是希望线路板材料的 Dk 值在任何条件下都不要发生变化。但实际情况是材料的“设计 Dk”会随频率、温度、厚度等多种因素的影响而发生改变。只有将本征电路材料 Dk 值的最大公差控制在  $\pm 0.05$  的范围内，才能保证相位的波动不会对系统的高精度和高可靠性产生影响。

为了监测线路板材料 Dk 随温度变化的情况，定义介电常数温度系数 (TCDk) 为：一定温度范围内、温度每升高  $1^\circ\text{C}$  时介电常数的相对平均变化率。这个参数对工作在温度差较大的应

用（例如 77 GHz 雷达）来说非常重要。任何应用于毫米波电路的线路板材料，都应该具有较低的 TCDk 值，这样才能最大程度地减小因 Dk 变化给电路性能（如相移）带来的影响。一些基于 PTFE 树脂体系的线路板材料，在室温（25°C 左右）环境中，其 Dk 值会因温度变化而发生陡变。对于大多数应用来说，TCDk 能控制在  $0 \pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  的范围内就认为是比较适合的。以 RO3003 线路板材料来举例，当温度从 -50 变化到 150°C 时，其 10GHz 频率下 z 轴方向的 TCDk 仅为 -3 ppm /°C。TCDk 越小也就意味着 Dk 随温度的变化也越小（如图 5 所示），这对于毫米波频率应用，以及那些需要在较大温度范围内保持性能稳定的电路来说至关重要。

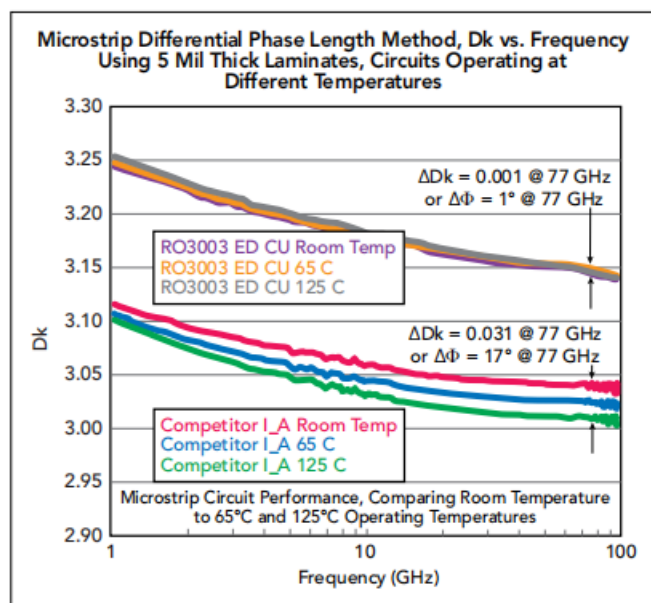


图 5 线路板材料随温度变化会导致设计 Dk 和相角的变化

在毫米波频率下，线路板材料的其它材料参数，如：介质损耗（Df）、吸湿率、玻璃编织效应等任意一个参数都会影响材料的“设计 Dk”值。与 Dk 一样，材料的 Df 也会受温度的影响，将其定义为：损耗因子热稳定系数（TCDf），顾名思义它也会随着温度的变化对电路设计产生影响。而吸湿率是指线路板材料吸收外界水份的总重量，它以百分比为单位来衡量。在较高的频率下该值越小越好，其典型值在 0.1%至 0.2%之间。罗杰斯 RO3003 层压板的吸湿率为 0.04%。

由于毫米波频率的波长很小，对于某些采用玻璃纤维加强的特殊 PCB 板材，其产生的“玻璃编织效应”也会对电路性能造成影响，这些影响与玻璃纤维在线路板介质中的分布方式有关。玻璃纤维布有两种常见的编织方式，一种是“交织开放式编织”，这种编织方式玻璃纤维束之间会存在一些缝隙；另一种是“均匀开纤式编织”，玻璃纤维束扁平且中间没有空隙。玻璃纤维被填充到整个材料中，其填充方式也有两种，一种是“均匀填充”，这种情况 x 轴和 y 轴上的玻璃纤维密度是相同的；另一种是“非均匀填充”，玻璃纤维在这两个轴上具有不同的密度。对于采用“交织形式编织”的玻璃纤维布，在没有玻璃纤维的缝隙区域其 Dk 值较低，两束玻璃纤维交叉形成的叠加区域其 Dk 值最高。当信号波长小到与这些缝隙的尺寸相当时，信号就会产生失真。

对于 77GHz 的雷达，如果选用具有较强“玻璃编织效应”的 PCB 材料，有可能会受到群延迟、传播延迟和相位角变化的影响。为保证相位稳定，应该为 77GHz 的电路选择采用“均匀开纤玻璃编织”作为填料的线路板材料，并且线路板材料的 Dk 变化要尽可能小。如果采用“交织开放式玻璃编织”作为填料的线路板材料，在 77GHz 频率下，Dk 值大概会有 0.09 的变化，这会带来大约 100 度的相角差。相角发生较大的变化，也就意味着这些材料的电路的群延迟和传播延迟会产生较大的差异。理想情况下，采用不含玻璃纤维的材料，如 RO3003 或 RO3003G2 层压板，就可以避免受到“玻璃纤维效应”的影响。

另外，选择不同的传输线技术也可能会对毫米波电路（例如 77GHz 汽车雷达）的性能产生影响。毫米波电路通常是多层混压 PCB 的一部分，这些多层混压还可能包含了数字电路、电源电路、甚至光电电路。毫米波电路通常使用微带线或 GCPW 传输线技术，在 PCB 加工过程中，GCPW 传输线更容易受到镀铜厚度、导体蚀刻精度、最终镀层表面处理等因素影响（如图 6 所示）。虽然微带线或者 GCPW 都可以用建模仿真来预期电路性能，但是在 77GHz 频率下，GCPW 的加工难度和受加工影响更大。

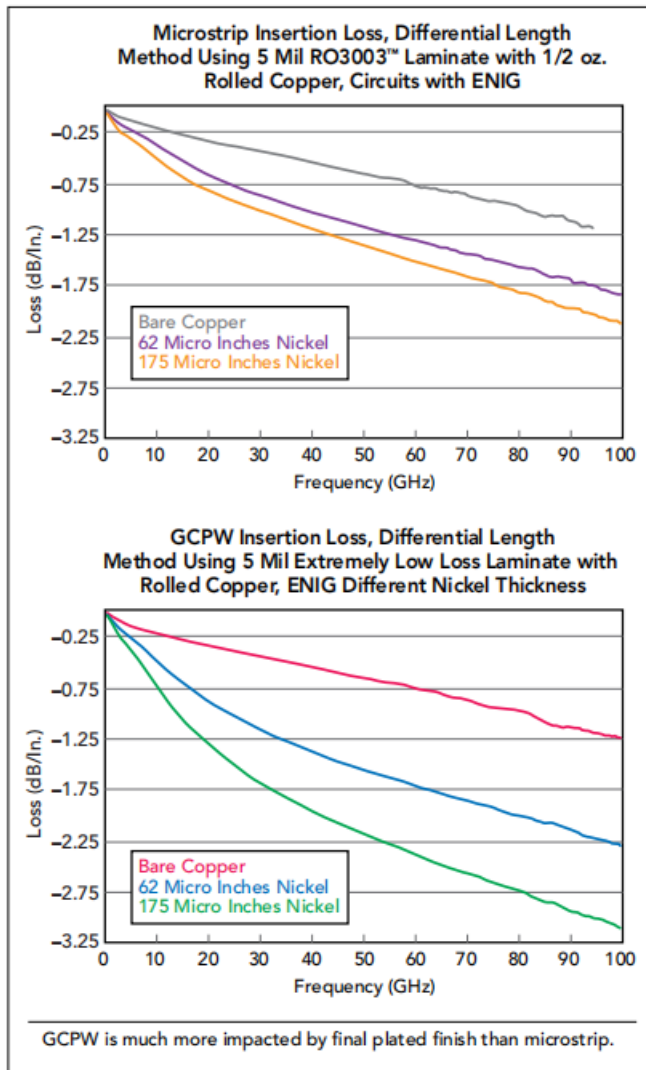


图 6 传输线技术的选择及其加工工艺对毫米波频率下电路的性能影响

为了评估不同线路板材料和铜导体类型对电路的影响,无论是使用全波电磁场仿真软件来仿真,还是直接加工出实物进行测试,都会耗费很多的时间和精力。一个更简单的方法是借助基于微软 Windows 平台开发的免费软件程序“MWI-2019”来进行分析。该软件可以从罗杰斯官方网站上免费下载。该软件(请参考“More on MWI-2019”)允许用户使用其内置的数据库,来验证材料厚度、铜导体表面粗糙度以及其它参数对“设计 Dk”的影响。同时该数据库也包含了许多其它不同材料的“设计 Dk”值。虽然该软件提供的结果精度略低,但它的计算时间却比全波电磁仿真软件快得多,几乎可以立即得到毫米波电路设计中使用不同材料和材料参数的初始值。

更多关于 MWI-2019 的信息

免费的 MWI-2019 软件可以帮助大家快速了解线路板材料在毫米波频率下的射频性能差异。它可以从罗杰斯公司 ([www.rogerscorp.com](http://www.rogerscorp.com)) 的官方网站上免费下载，可以在大多数兼容微软操作系统的个人电脑上运行。它采用快速响应的封闭式方程（相对于运行时间较长的全波电磁场仿真软件）来计算不同材料和不同 Dk 值对高频传输线（包括微带线、带状线和接地共面波导 GCPW）的性能影响。

这款简单易用的软件是基于材料的“设计 Dk”来设计的，它拥有一个大型数据库，包含了不同材料和铜导体在特定频率下的实测值。“设计 Dk”不仅考虑了介质材料的 Dk，还考虑了诸如频率、基板厚度和铜表面粗糙度等参数，这些参数都可能会对电路传输线的 Dk 产生影响。

尽管 MWI-2019 无法达到全波电磁场仿真软件那样的精度，但它可以在极短的时间内提供不同传输类型、铜箔类型和基板厚度的计算结果，并且可以在 110 GHz 频率范围内为不同的候选线路板材料提供一个可供参考的初始值。



## 一种针对毫米波雷达天线应用而优化设计的 PCB 层压板

罗杰斯公司, 钱德勒市, 亚利桑那州

常见的复合材料印制电路板 (PCB) 其介质层大多采用玻璃纤维作为填充料, 但是由于玻璃纤维特殊的编织结构, 导致 PCB 板局部的介电常数 (Dk) 会发生变化。尤其是在毫米波 (mmWave) 频率下, 较薄层压板的玻璃编织效应会更加明显, Dk 的局部不均匀会导致射频 (RF) 电路和天线性能发生明显的变化。采用 100 $\mu\text{m}$  厚的玻璃编织聚四氟乙烯 (PTFE) 层压板, 研究其 PCB 结构对传输线性能的影响, 根据不同玻璃编织结构的类型, 实验发现 PCB 板的介电常数波动范围在 0.01 和 0.22 之间。为了研究不同玻璃编织结构对天线性能的影响, 在罗杰斯的商用层压板 RO4835™ 和 RO4830™ 热固性层压板上分别制作了一个串联馈电微带贴片阵列天线, 并对其进行研究, 实验结果显示: 采用 RO4830 层压板按照正常公差加工的天线其电性能与计算值更加吻合, 变化更小, 并且具有较好的反射系数 ( $S_{11} < -10\text{dB}$ ) 和视轴增益性能。

自动驾驶汽车是当前的研究热点, 它可以帮助驾驶员和行人避免潜在的致命事故, 要求具有高可靠性, 因此也要求其组成电路必须具有高可靠性。毫米波 (mmWave) 雷达正是因其具有结构紧凑、环境探测灵敏度高等诸多优点, 为自动驾驶中的目标检测提供了可靠的、精确的解决方案。在 76 至 81GHz 频率下的商用毫米波雷达系统中, 串联馈电的微带贴片天线因其易于设计、结构紧凑、能够大批量、低成本<sup>[1]</sup> 制造而成为首选。频率越高波长越小, 因此与低频相比, 工作于毫米波频率下的传输线和天线尺寸会更小。为了确保车载雷达的理想性能, 需要研究 PCB 对传输线和微带贴片天线的影响。对于长时间工作在室外环境下 (受温度和湿度影响) 的毫米波频率电路<sup>[2]</sup>, 在选择 PCB 线路层压板时, 首要考虑的是材料性能指标的一致性。但是, 构成层压板的铜箔、玻璃纤维增强材料、陶瓷填料等材料在高频下都会对指标的一致性产生较大影响。

本文主要研究PCB结构对毫米波雷达性能的影响。大多数PCB层压板的介质层通常是通过在玻璃纤维布上涂布聚合树脂形成的。在毫米波频率下，玻璃纤维布对材料性能一致性的影响非常明显，这是因为玻璃束的宽度与传输线的宽度相当。此外，当采用较薄（例如，100 $\mu\text{m}$ ）的PCB线路层压板来设计微带天线时，玻璃编织布会引起天线性能的显著变化并降低加工成品率。

### PCB层压板的组成

PCB层压板通常是将玻璃纤维布与聚合树脂组合形成介质层，再在其两侧覆盖铜箔制成。玻璃布的典型介电常数（ $D_k$ ）较高，约为6.1，而低损耗聚合物树脂的介电常数 $D_k$ 在2.1-3.0之间，这样在较小的区域内 $D_k$ 有一定的差异。图1显示了层压板中玻璃编织纤维的微观顶视图和横截面视图。“指节交束区（Knuckle-Bundle）”上方的电路由于玻璃纤维含量较大而具有较高的 $D_k$ ，而“束开口区（Bundle-Open）”上的电路由于树脂含量较大而具有较低的 $D_k$ 。此外，玻璃编织布的特性受到玻璃织物的厚度、织物之间的距离、织物的扁平化方式以及每个轴的玻璃含量等多个因素影响。

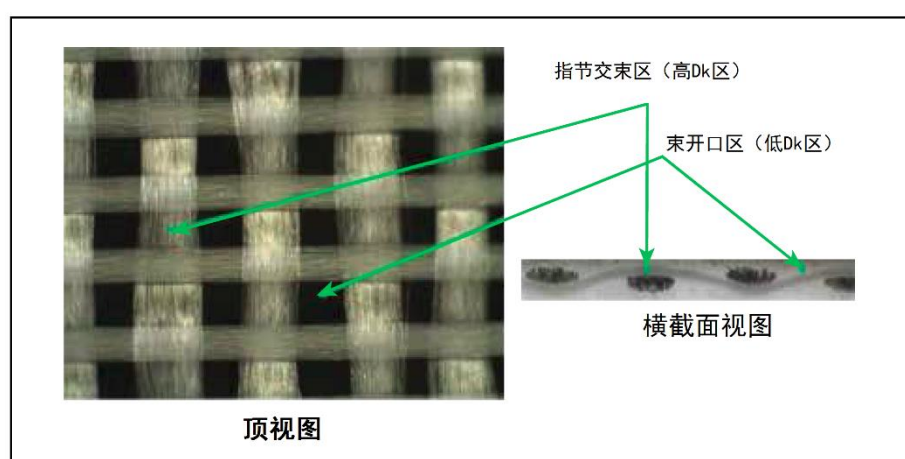
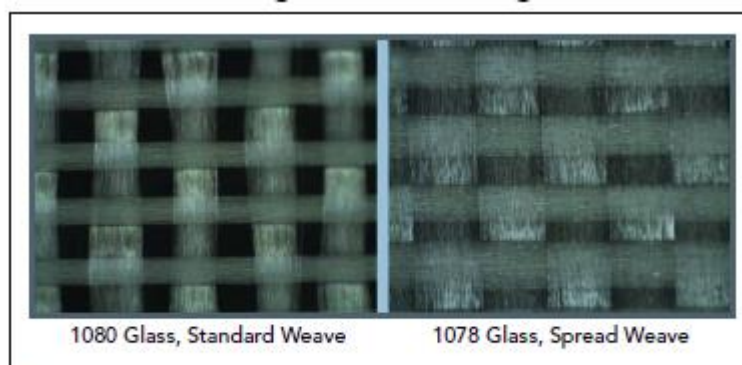


图1 玻璃纤维布层压板的微观顶视图和横截面图

在毫米波应用的薄层压板中，经常用到两种典型的薄玻璃布编织样式，分别是1080型和1078型，如图2所示。1080型标准编织采用了不平衡玻璃布，该型号的玻璃布其中一个轴

的玻璃含量高于另一个轴。与1080型编织布相比，1078型开纤的玻璃编织具有更均匀的玻璃纤维平面，因此整个层压板上的Dk变化较小。与使用多层玻璃布层压板相比，单层玻璃布层压板的Dk值变化更为显著。另外，具有陶瓷填料的层压板材料可以减少因玻璃布编织方式不同而造成的Dk变化。



▲ Fig. 2 Microscopic views of the 1080 (open and unbalanced weave), and the 1078 (spread weave) glass construction styles.

图2 1080型（开口不平衡编织）和1078型（开纤）玻璃布结构的微观视图

### 对传输线电路的影响

本次测试实验使用的是微带传输线电路，采用的1 mm端接连接器。连接器首先连接到50欧姆接地共面波导（GCPW），通过阻抗变换器将其转换为高阻抗微带传输线。如图3所示，微带传输线的长度为2英寸，确保了实验电路能够测试出玻璃编织结构所带来的影响。电路采用玻璃编织聚四氟乙烯（PTFE）的薄层压板加工，使用压延铜和单层玻璃布。为了比较不同的玻璃编织结构带来的影响，在三种不同的PCB层压板结构上制作了传输线电路，分别采用：1080型玻璃布的PTFE聚四氟乙烯、1078型玻璃布的PTFE聚四氟乙烯、1080型玻璃布的陶瓷填充非PTFE层压板。对加工后的电路进行仔细检查，分别筛选合适的传输线进行测试，测量电路的幅度和相角特性。通过相位角（展开后的相位值）、群延迟（基于随频率变化的相位角）、传播延迟（根据相位角计算）这三个参数来确定层压板的介电常数变化。



▲ Fig. 3 Microstrip transmission line transitioning from a GCPW.

图3 采用GCPW信号馈入的微带传输线

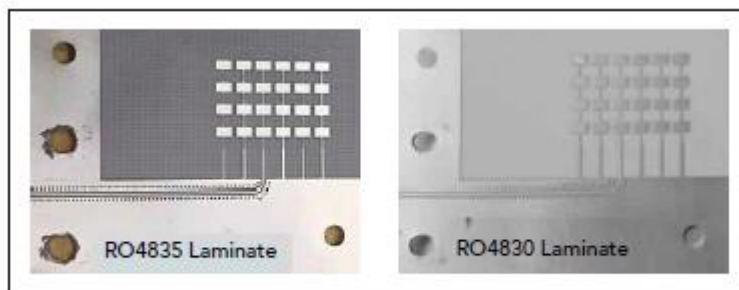
表1显示了与“指节交束区”以及与“束开口区”对准的传输线电路的原始群延迟、传播延迟和相位差。可以看到，Dk值越高，电磁波的传播速度就越慢，这与群延迟、传播延迟和相位差增加相吻合。根据电路的群延迟、传播延迟和相位差，表2显示了计算后的介电常数变化。1078型开纤的编织层压板具有均匀的玻璃布分布，因此，与1080型标准编织层压板相比（Dk值变化为0.22），其Dk值变化较小，仅为0.03。如前所述，陶瓷填充层压板的Dk变化更小，只有0.02。

表1 玻璃布“指节交束区”和“束开口区”之间测得的性能差异			
玻璃纤维编织方法	“指节交束区”和“束开口区”之间的平均差		
	40 GHz 到 80 GHz		77GHz相位差 (度)
	群延时 (皮秒)	传播延时 (皮秒)	
1078型开纤编织	1	1.3	20
1080型标准编织, 不平衡	7.3	10.1	149
陶瓷填充1080型标 准编织, 不平衡	0.3	0.6	10

表2 计算“指节交束区”和“束开口区”之间的性能差异			
玻璃纤维编织方法	“指节交束区”和“束开口区”之间的Dk等效差 ( $\Delta Dk$ )		
	40 GHz 到 80 GHz		77GHz相位角 $\Delta Dk$
	群延时 $\Delta Dk$	传播延时 $\Delta Dk$	
1078型开纤编织	0.02	0.03	0.02
1080型标准编织, 不平衡	0.17	0.22	0.14
陶瓷填充1080型标 准编织, 不平衡	0.01	0.02	0.01

#### 对天线性能的影响

串联馈电的微带贴片天线阵是最典型的用于毫米波汽车雷达的天线。为研究玻璃纤维效应对天线性能的影响，设计了一个1×4的串联馈电微带贴片天线，其工作频率范围为76-81GHz<sup>[3]</sup>。如图4所示，该天线使用RO4835™ 和RO4830™ 两种不同的玻璃布层压板材料加工而成。该天线由接地的相邻元件制成，以研究其耦合效应。



▲ Fig. 4 Fabricated series fed microstrip patch array on the RO4835 and the RO4830 laminates.

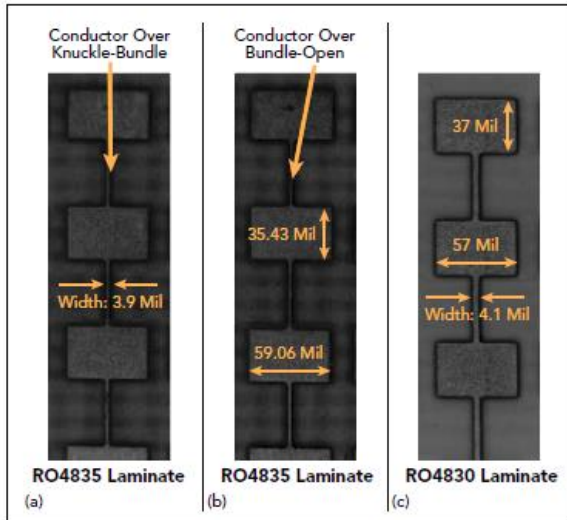
图4 加工在RO4835和RO4830层压板上的串联馈电微带贴片阵列

RO4835层压板在10GHz下的介电常数为3.48，损耗角正切为0.0037（基于IPC TM-650

2.5.5.5标准测试)。另外，RO4830层压板的介电常数为3.24，损耗角正切为0.0033（基于IPC TM-650 2.5.5.5标准测试）。RO4835层压板分别采用1080型标准编织的不平衡玻璃布，以及经过陶瓷填充物加固的材料。相比，RO4830层压板采用1035型扁平开纤玻璃编织和陶瓷填充较小颗粒物进行增强。表3进一步比较了基于RO4835和RO4830层压板的特性。

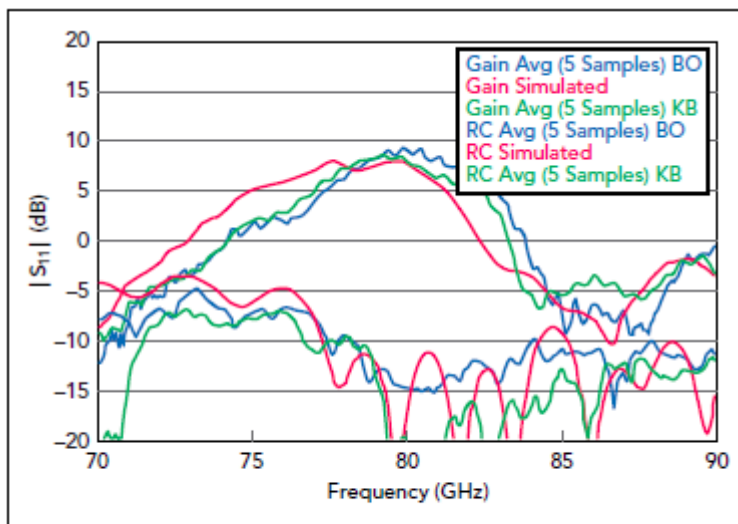
表3 RO4835与RO4830层压板的比较		
玻璃布的结构形式	RO4835层压板	RO4830层压板
介电常数	3.48	3.21
损耗角正切	0.0037	0.0033
基板厚度	100 $\mu$ m	100 $\mu$ m
陶瓷填料尺寸	粗糙	精细且均匀
玻璃含量	高	低
层压板类型	热固性	热固性

挑选出加工后符合设计尺寸，并且天线传输线与RO4835层压板的“指节交束区”以及“束开口区”对准的天线，如图5 (a) 和 (b) 所示。由于RO4830层压板采用了扁平开纤的玻璃编织结构，因此在RO4830层压板中不用考虑导体是否与玻璃织物对齐了，如图5 (c) 所示。分别测量加工的天线的反射系数 (S11) 和视轴增益。



▲ Fig. 5 Antennas over knuckle-bundle and bundle-open glass fabric region on RO4835 laminate, and a sample antenna on RO4830 laminate.

图5 RO4835层压板上与“指节交束区”以及“束开口区”对准的天线，以及RO4830层压板上的天线样品  
 为了简便起见，本文给出的结果均来自多个被测天线测试数据的平均值，并且将测量结果与仿真结果进行了比较。图6是RO4835层压板上的天线（五个样品）测试结果，在“指节交束区”以及“束开口区”的反射系数（ $S_{11}$ ）和视轴增益都发生了显著变化。RO4835上的天线性能取决于导线与“指节交束区”以及“束开口区”的对准情况。此外，天线增益随频率也发生了变化，表明介电常数也在变化。而且，向高频的方向的偏移表明介电常数较低。

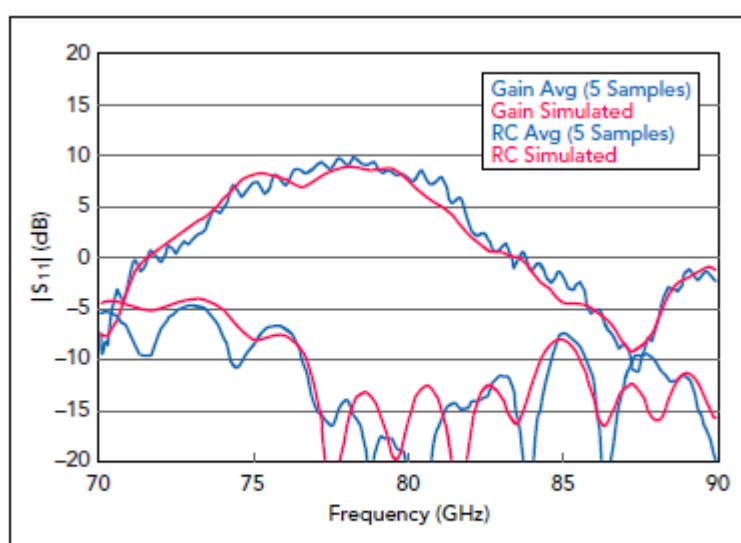


▲ Fig. 6 Comparison of measured results to simulation for antenna samples on the knuckle-bundle (KB) and bundle-open (BO) glass fabric region of the RO4835 laminate.

图6 在RO4835层压板的“指节交束区 (KB)” 以及“束开口区 (BO)” 天线样品的测量结果与仿真结果对比情况



对比如图7所示RO4830层压板上的天线性能，测试得到的天线性能是非常一致的，并且与RO4830层压板的仿真值更加匹配。测量结果与仿真的一致性表明，层压板的介电常数变化最小。两个结果对比，视轴增益在标准编织的RO4835层压板材料中最大变化了4 dB，而在扁平开纤编织的RO4830层压板中最大变化只有2 dB。通过这样的简单的实验可以得到，通过使用具有扁平开纤玻璃编织构造样式的罗杰斯 RO4830层压板，可以得到更加一致的反射系数和视轴增益等天线性能。



▲ Fig. 7 Comparison of measured results to simulation for antenna samples on the RO4830 laminate.

图7 RO4830层压板上天线样品的测量结果与仿真结果的对比情况

## 结论

PCB层压板的结构会影响传输线和天线性能。玻璃布的构造方式也会改变层压板上的介电常数，从而会降低产品性能并且影响产品的良品率。与RO4835层压板相比，用RO4830层压板加工的天线其指标性能一致性更好。天线性能和加工良品率的提高主要归因于层压材料的结构，即：扁平开纤的玻璃编织、较少的玻璃含量（导体远离玻璃纤维）、较厚的基材等。天线性能的提高同样也与该材料的电性能有关，就如RO4830层压板，具有较低的介电常数和较低的损耗角正切值。因此，在较小波长的毫米波频率雷达应用中，用罗杰斯RO4830层压板加工出来的天线性能和一致性优于用RO4835层压板加工出来的天线性能。

## 参考文献

1. R. Garg, P.Bhartia, I.Bahl, A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook," Artech House, 2001.
2. J. Coonrod, "Characterizing Circuit Materials at mmWave Frequencies," Microwave Journal, Vol 62. Edition 5, May 2019.
3. C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design," 4th Edition, Chapter 17, Wiley, 2016.