用于5G的PCB中的金属化通孔的性能评估

Evaluating PCB Plated Through Holes For 5G Applications

John Coonrod，Rogers Corp., Chandler, Ariz.

5G无线网络覆盖的频率范围很广，对工作于毫米波频率下的线路板材料提出了更高的要求。本文探讨了面向5G应用的高性能印刷线路板（PCB）上从顶部铜层到底部铜层的金属化通孔（PTH）的内壁粗糙度对射频性能的影响。

5G无线网络正在成为实现现代电子通信的最大技术进步之一，5G技术目前使用的信号载波频率有如前几代无线通信网络的6GHz以下的频率，但也有用于短距离、高速数据链路的毫米波频率。在如此宽频率范围内的电路需要使用特殊的线路板材料，而罗杰斯公司的RO4730 G3™线路板从射频到毫米波频率都具有出色的的性能，成为许多电路设计工程师的选择。然而，这种类型的线路板与更传统的线路板材料之间的区别是，其在介质的填料中使用了空心微球，这引起了一些电路设计工程师的关注。由于微球的存在，从加工电路结构的微观上——例如从一个导电层到另一个导电层的金属化通孔（PTH）——看起来比在没有这种介质填料的传统的线路板材料制作的金属化通孔要更加粗糙。这仅仅是外观上的一点不同，还是对性能有影响？经过大量的测试，结果表明，微球填料对金属化通孔表面粗糙度的影响纯粹是表面的，并不影响电路性能。

金属化通孔的比较测试试验

所有电路金属化通孔的孔壁的纹理都可能变化，即使在同一线路板中。由于钻孔过程中出现的多种因素，不同通孔的孔壁表面粗糙度存在很大差异。例如，在具有微球填料的材料中，钻头可能影响，也可能不影响微球。当钻头撞破空心球体时，该通孔的镀铜将遵循破碎球体的轮廓生长，这样通孔壁表面将不会光滑和平坦（如图1所示）。我们很自然地会问到，与传统的线路板材料相比，这种粗糙的孔壁是否会导致电气性能、可靠性等方面的差异。通常，对于不使用微球填料的传统高频线路板材料，粗糙的孔壁表面可能暗示了PCB制造过程中存在问题，可靠性成为一个问题。然而，对于空心微球填料的线路板材料，表面粗糙的金属化通孔是正常的，并不意味着其性能指标下降。

我们在评估金属化通孔及其孔壁表面对高

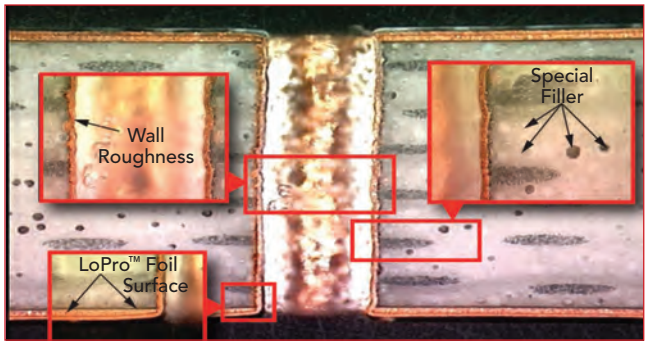

图1：采用空心微球填料的线路板可能形成表面粗糙的金属化通孔。

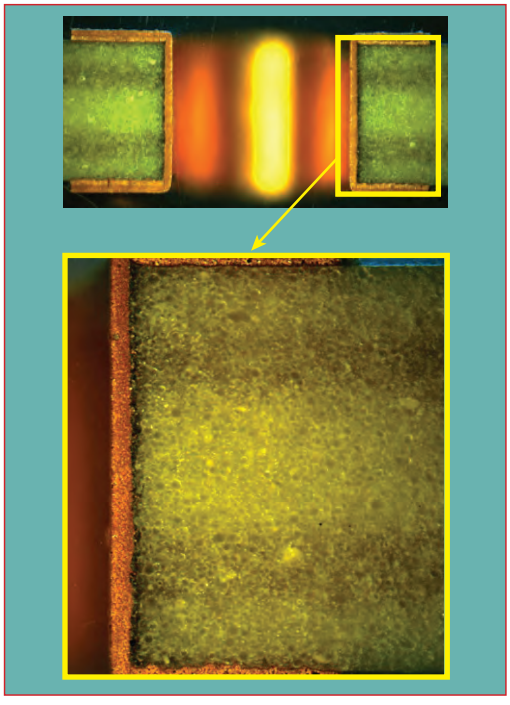

图2：20 mil RO3003G2中相对平滑的金属化通孔壁的显微图像。

频电路性能的影响之前，对RO4730G3线路板及其微球填料进行了广泛的评估，以充分了解它们在不同工作条件下的特性。进行了包括10层板的高加速热冲击试验、双面板金属化通孔可靠性、双面板孔-孔导电阳极丝（CAF）电阻、平面-平面CAF电阻、最高工作温度和表面贴装技术测试、绝缘电阻、金属化通孔质量等一系列的材料研究。该材料及其微球在工业标准测试条件下通过了这些测试。有关这些测试的其它信息可以在罗杰斯公司网站的“技术支持中心”找到。

金属化通孔孔壁表面的纹理通常被认为是电路制造的问题，而不是材料的问题。尽管如此，材料特性还是会产生不同的影响，包括材料填充类型、填料尺寸、玻璃布或树脂类型。本试验进行的射频测试比较了来自罗杰斯公司的具有玻璃增强材料和微球填料的20.7mil厚的RO4730G3线路板和没有玻璃增强材料且具有更小非空心填料的20mil厚的RO3003G2线路板。这两种材料的介电常数（Dk）或相对介电常数（ε_r）近似为3，厚度相同。而主要的区别在于，假设二者均采用最佳PCB制造方法，RO3003G2材料会有更加光滑的铜通孔壁面，而RO4730G3的金属化通孔壁面更粗糙。这是因为RO4730G3线路板材料及其空心微球填料，而RO3003G2没有玻璃增强、极小颗粒且均匀的填料。实际上，如图2所示，RO3003G2线路板材料上的确具有非常光滑的通孔孔壁。

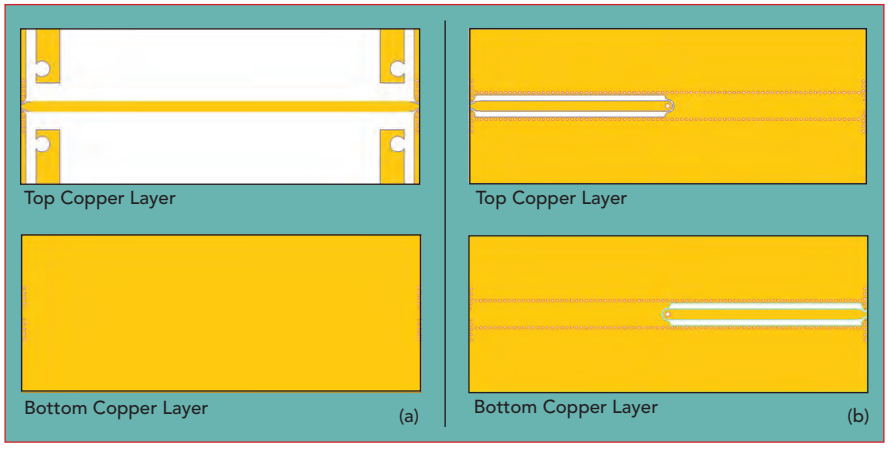

图3：标准微带传输线(a)和带金属化通孔的测试电路(b)，用于评估通孔孔壁粗糙度对射频性能的影响。

如图1和图2所示，两种材料中通孔表面粗糙度的差异还是很明显的，但是这会影响射频性能吗？首先我们来看测试电路的设计。对于测试电路设计，微带传输线电路提供了一种有效的方法来比较光滑和粗糙的通孔壁表面的影响，因为与其它高频传输线相比，微带线的PCB加工过程中的一些变化对射频性能的影响较小。本研究的微带电路均采用了一些特殊设计，使其工作频率达到40GHz仍有较好的性能。如图3a所示，“标准”微带传输线测试电路在端部具有接地的共面波导（GCPW）结构，以很好地连接2.4mm同轴连接器（来自西南微波的型号#1492-04A-5）以获得很好的高频性能。图3b显示了用于本试验的中间具有通孔的测试电路。电路的长度为2英寸，其使用的松耦合的接地共面波导传输线电路，将具有与微带传输线电路非常相似的射频性能。这种设计提高了高频性能，非常适合40 GHz下的测试。

在相同材料上制作许多相同设计的电路，以区别评估材料变化和PCB制造工艺不确定性的影响导致的RF性能差异。原始大板线路板材料尺寸为24×18英寸，切割成两个尺寸均为12×18英寸的小板，这样保证了不同电路的材料的一致性。在电路的制作加工中，采用了相同的加工工艺，分别得到基于20mil厚的RO3003G2线路板材料上的光滑通孔孔壁和20.7mil厚的RO4730G3线路板材料的粗糙通孔孔壁的电路。

TABLE 1

S_{21} PHASE MEASUREMENTS

RO3003G2 (Smooth PTH Via Hole Wall)

	Phase Angle (°)			Phase Angle Difference (°)		
Circuit ID	24 GHz	28 GHz	39 GHz	24 GHz	28 GHz	39 GHz
No via	–3189	–3728	–5237	Reference	Reference	Reference
P1 C1	–3167	–3708	–5237	22	20	0
P1 C2	–3169	–3711	–5241	20	17	–5
P1 C3	–3165	–3706	–5233	24	23	3
P1 C4	–3163	–3704	–5231	26	24	6
P1 C5	–3165	–3706	–5234	23	22	3
P1 C6	–3166	–3707	–5236	23	21	0
No via	–3186	–3725	–5233	Reference	Reference	Reference
P2 C1	–3167	–3707	–5233	19	18	0
P2 C2	–3165	–3706	–5231	21	19	2
P2 C3	–3164	–3704	–5227	22	22	6
P2 C4	–3163	–3703	–5226	23	23	7
P2 C5	–3165	–3705	–5229	21	20	4
P2 C6	–3161	–3701	–5223	25	25	10

PANEL 1

PHASE ANGLE DIFFERENCE (°)

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
Average	22.93	21.13	1.11
Std Dev	1.91	2.32	3.56
Range	5.64	6.76	10.13

PANEL 2

PHASE ANGLE DIFFERENCE (°)

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
Average	22.00	21.20	4.83
Std Dev	2.13	2.40	3.62
Range	5.93	6.70	9.97

测试结果

测试得到了大量的数据，包括插入损耗、回波损耗、阻抗、群延迟和相位角。图4显示了设计的测试电路（如图3b）的矢量网络分析仪屏幕截图，展示了频率和时域的结果。从图4a中可知，$|S_{21}|$在标记2的39GHz处为3.93dB。

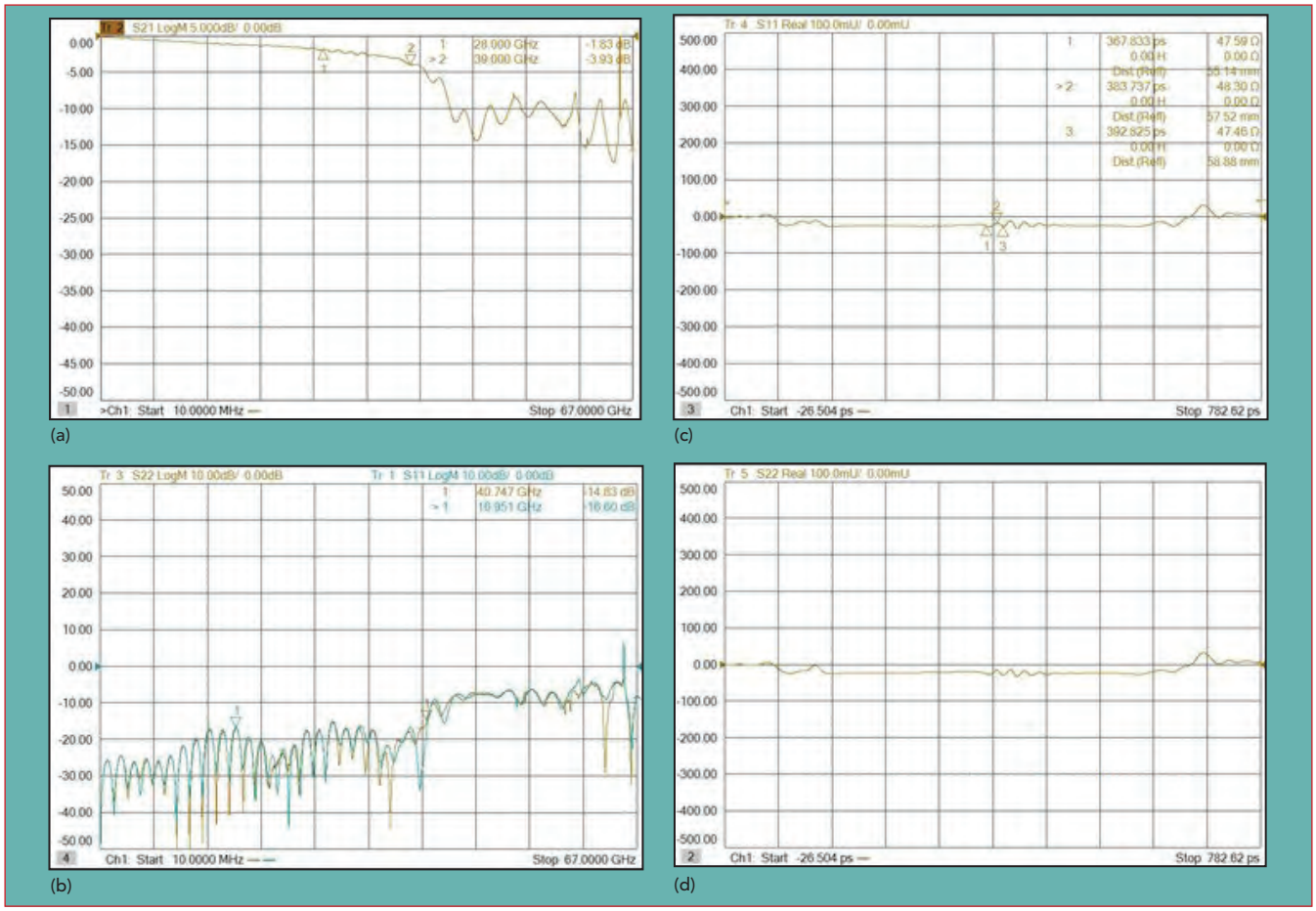

图4：被测量的通孔测试电路：$|S_{21}|$（a），$|S_{11}|$和$|S_{22}|$（b）；实阻抗与传输距离的关系，如S_{11}，即从端口1（c）观察电路的阻抗，以及作为S_{22}，即从端口2（d）观察电路的阻抗。

在图4b中，标记1表示的|S11|和|S22|在40.7GHz时小于14.83dB。使用时域反射法测试线路的阻抗，如图4c和d所示，在通孔过渡中的标记1、2和3处，电路的阻抗大约在48Ω。尽管在通孔过渡中仍可观测到较小的阻抗变化，但它们的阻抗小于2Ω并且对电路的40GHz以下的RF性能几乎没有影响。此时，电路可被认为具有良好的通孔设计。

我们收集了所有的测量结果来显示了通孔带来的影响。但微带电路（或松散耦合的接地共面波导）的阻抗主要受介质厚度、导体宽度，铜厚变化以及介质Dk等参数的影响。同样，通孔的阻抗也受这些因素的影响，但并不与孔壁粗糙度相关。出于上述原因，虽然收集到了阻抗数据，但阻抗并未用于评估通孔孔壁表面对射频性能的影响。由于类似微带传输线的导体的表面粗糙度影响通过它的信号的相位角1,2，因此，相位是评估通孔孔壁对RF信号链路影响的灵敏参量。对于测试的可重复性，同一个电路上的S_{21}相位角测量，在39GHz时的标准方差是±1.2度。这里，S_{21}相位角指的是展开相位角，是-180至+180度相位角的值总和。39 GHz时的标准方差是±1.2度，就意味着5G应用中39GHz的频率下孔壁粗糙度变化的分辨率是±1.2度，那么对于较低频率引起的相位变化就更不敏感。对于Dk为3的线路板材料上的2英寸长微带传输线，39 GHz下的相位角总和的范围将可达到数千度，因此该测试电路和测量方案可提供合适的相位分辨率。

对结果进行分析，表1显示了使用一块18*12 inch的RO3003G2基板材料加

TABLE 2
S_{21} PHASE MEASUREMENTS

RO4730G3 (Rough PTH Via Hole Wall)			
Panel 1 Phase Angle Difference (°)			
	24 GHz	**28 GHz**	**39 GHz**
Average	23.85	24.03	7.70
Std Dev	2.28	2.73	3.29
Range	6.06	6.89	7.60
Panel 2 Phase Angle Difference (°)			
	24 GHz	**28 GHz**	**39 GHz**
Average	19.68	18.61	–4.16
Std Dev	2.23	2.74	4.05
Range	6.83	8.31	10.47

TABLE 3
PHASE ANGLE (°)

Circuit ID	24 GHz	28 GHz	39 GHz
P2 C1	–3192	–3738	–5279
P2 C2	–3193	–3738	–5282
P2 C3	–3192	–3738	–5277
P2 C4	–3188	–3733	–5273
P2 C5	–3195	–3742	–5283
P2 C6	–3193	–3740	–5283
Average	–3192	–3738	–5279

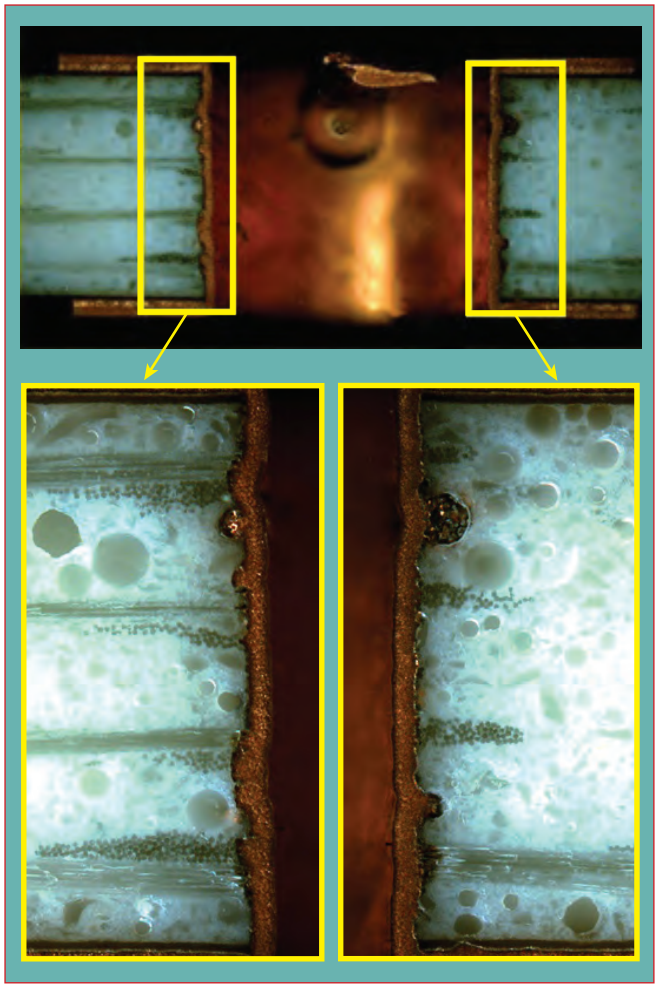

图5：用20 mil RO4730G3线路板制作的PTH侧壁近景照片。

工的具有相同设计的六个电路的数据，分别以没有通孔的微带传输线作为参考。表格中还示出了另一块18*12 inch板材上加工的具有相同设计的六个不同电路的数据（这两块18*12 inch的基板来自于同一块24*18 inch基板）。电路ID表示电路来自哪个板以及该板上的电路编号。例如，P1C4表示来自第一块板子、电路编号为4。为实现一致性，电路彼此之间互相远离并均匀地分布在板上。PCB制造过程会造成一定的不确定性，如导体宽度的变化、镀铜厚度的变化和钻孔质量的变化，但它们几乎与通孔壁粗糙度无关。此外，通孔周围的较小的隔离距离也会由于PCB加工带来一些不确定性。还有，每个材料上的微小变化如Dk值的微小变化，也可能导致变化。考虑到这些不确定性，在39 GHz相位的可重复性在±1.2度是合理的。

虽然Dk的变化不是测量评估中的一个因素，但需注意到RO4730G3线路板材料的Dk容限在±0.05以内。在更高的频率下，即使轻微的Dk变化有时也是很明显的：例如，在39 GHz时，0.05的Dk偏移将导致大约为15.3度的相位角变化。对于±0.05的公差或0.10的总Dk偏移，39GHz处的相位角可能会有多达30.6度的变化。当考虑表1中的相位角变化时，这个数值是很好的参考。但由于这些测试电路都来自于同一块大板，因此可以预期由于Dk变化导致的相位角变化非常小。

表2显示了使用RO4730G3线路板加工的具有更粗糙的通孔孔壁的电路的相位差异平均值、标准差和相位变化范围。通过比较表1和表2，可以看出RO3003G2和RO4730G3线路板之间的统计差异并不明显。如前所述，在这些试验过程中，为了尽量减少材料带来的变化，电路板1和2都来自同一块大板。对于相位角的比较结果以及出现的任何差异主要是来自电路加工的影响。当对结果的分析仅限于同一张电路板时，相位角由于材料带来的影响是最小的。每张大板上电路的S21的展开相位角上都有一定的变化，但考虑到在两种不同材料上制作的电路时，可以看到这种变化并不显著。

显然，通过观测显微照片，不同材料上的通孔的孔壁呈现出很大的不同。例如，图2显示了在20mil厚的RO3003G2线路板上加工的电路P1C1的通孔，它具有非常光滑的通孔孔壁。而基于20.7mil厚的RO4730G3线路板材料的电路P2C6（见图5）则具有较粗糙的通孔孔壁。仅从外观上看，可能会有一些理由担心这种通孔壁表面粗糙度对射频性能的影响。但正如上述几项研究所表明的那样，粗糙和平滑的通孔孔壁之间的差异纯粹是表面的，并不对射频/微波/毫米波性能产生影响，至少在40 GHz以下是这样的（见表3）！

结论

本文中报告的信息仅是全部电路测试数据的一小部分。这些测试的目的是证明通孔表面粗糙度对毫米波频率下的RF性能的影响。结果表明，粗糙的通孔壁与光滑的通孔壁之间只是外观不同，并不影响40 GHz以下的射频、微波和毫米波的性能。■

参考文献

1. J. W. Reynolds, P. A. LaFrance, J. C. Rautio and A. F. Horn III, “Effect of Conductor Profile on the Insertion Loss, Propagation Constant, and Dispersion in Thin High Frequency Transmission Lines,” DesignCon, May 2010.
2. A. F. Horn III, P. A. LaFrance, C. J. Caisse, J. P. Coonrod and B. B. Fitts, “Effect of Conductor Profile Structure on Propagation in Transmission Lines,” DesignCon, January 2016.

上接第34页

16. C. Gu, “Short-Range Noncontact Sensors for Healthcare and Other Emerging Applications: A Review,” Sensors, Vol. 16, No. 8, July 2016.
17. C. Gu and C. Li, “From Tumor Targeting to Speech Monitoring: Accurate Respiratory Monitoring Using Medical Continuouswave Radar Sensors,” IEEE Microwave Magazine, Vol. 15, No. 4, June 2014, pp. 66–76.
18. K. van Loon, M. J. M. Breteler, L. van Wolfwinkel, A. T. Rheineck Leyssius, S. Kossen, C.J. Kalkman, B. van Zaane and L. M. Peelen, “Wireless Non-Invasive Continuous Respiratory Monitoring with FMCW Radar: a Clinical Validation Study,” Journal of Clinical Monitoring and Computing, Vol. 30, No. 6, December 2016, pp. 797–805.
19. C. Li, J. Lin and Y. Xiao, “Robust Overnight Monitoring of Human Vital Signs by a Non-Contact Respiration and Heartbeat Detector,” International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, August 2006, pp. 2235–2238.
20. E. Yavari, C. Song, V. Lubecke and O. Boric-Lubecke, “Is There Anybody in There?: Intelligent Radar Occupancy Sensors,” IEEE Microwave Magazine, Vol. 15, No. 2, March-April 2014, pp. 57–64.
21. A. Santra, R.V. Ulaganathan and T. Finke, “Short-Range Millimetric-Wave Radar System for Occupancy Sensing Application,” IEEE Sensors Letters, Vol. 2, No. 3, September 2018.
22. Y. Taigman, M. Yang, M. A. Ranzato and L. Wolf, “Deepface: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification,” Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, September 2014, pp. 1701–1708.
23. F. Schroff, D. Kalenichenko and J. Philbin, “Facenet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering,” Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 2015, pp. 815–823.
24. G. Koch, R. Zemel and R. Salakhutdinov, “Siamese Neural Networks for One-Shot Image Recognition,” ICML Deep Learning Workshop, Vol. 2, 2015.
25. J. Weiß, A. Santra, “One-Shot Learning for Robust Material Classification using Millimeter-Wave Radar System,” IEEE Sensors Letters, Vol. 2, No. 4, 2018.
26. J. Lien, N. Gillian, M. E. Karagozler, P. Amihood, C. Schwesig, E. Olson, H. Raja and I.Poupyrev, “Soli: Ubiquitous Gesture Sensing with Millimeter Wave Radar,” ACM Transactions on Graphics, Vol. 35, No. 4, July 2016.
27. S. Wang, J. Song, J. Lien, I. Poupyrev and O. Hilliges, “Interacting with Soli: Exploring Fine-Grained Dynamic Gesture Recognition in the RF Spectrum,” Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, October 2016, pp. 851–860.
28. H. S. Yeo, G. Flamich, P. Schrempf, D. Harris-Birtill and A. Quigley, “Radarcat: Radar Categorization for Input and Interaction,” Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, October 2016, pp. 833–841.
29. K. Diederichs, A. Qiu and G. Shaker, “Wireless Biometric Individual Identification Utilizing Millimeter Waves,” IEEE Sensors Letters, Vol. 1, No. 1, February 2017, pp. 1–4.