

5G 基站射频单元低插损滤波器件选型与布局设计

耿同贺, 姜兆国

中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/ME.2025080001

摘要： 在5G基站射频单元中，其系统覆盖与能效直接受到滤波器件性能的影响，为了实现5G基站中射频单元低插损滤波器件的科学选型与合理布局设计，本文探讨了射频单元低插损滤波器件的核心作用，对 SAW、BAW 和陶瓷介质的低插损滤波器件进行了类型对比分析，明确其插入损耗、带外抑制等核心指标，并根据选型量化模型与工程流程，对电磁兼容性驱动的布局原则及仿真优化方法进行了深入探讨，经过实验室与现场实测的验证设计，从而为滤波器件在5G基站中的高效选型与布局提供了可靠的理论支撑与实践路径。

关键词： 5G基站；射频单元；低插损滤波器件；器件选型；布局设计

Selection and Layout Design of Low-Insertion-Loss Filter Components for 5G Base Station RF Units

Geng Tonghe, Jiang Zhaoguo

13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract： In 5G base station RF units, system coverage and energy efficiency are directly influenced by filter performance. To achieve scientific selection and rational layout design of low insertion loss filters for RF units in 5G base stations, this paper explores the core role of such filters. A comparative analysis of SAW and ceramic dielectric low insertion loss filters is conducted, clarifying their key metrics including insertion loss and out-of-band suppression. Based on a selection quantification model and engineering workflow, electromagnetic compatibility considerations are integrated into the design process. BAW, and ceramic dielectric low-insertion-loss filter devices, clarifying their core metrics such as insertion loss and out-of-band suppression. Based on a selection quantification model and engineering workflow, this paper delves into electromagnetic compatibility-driven layout principles and simulation optimization methods. Through laboratory and field-tested validation designs, it provides reliable theoretical support and practical pathways for the efficient selection and layout of filter devices in 5G base stations.

Keywords： 5G base station; RF unit; low insertion loss filter device; device selection; layout design

引言

5G 基站射频单元是无线通信的关键核心，其滤波器件性能对信号的质量与系统能效有着决定性的影响。本文对滤波器件在5G场景下的关键作用进行探讨的基础上，从主流类型适用性对比出发，对插入损耗、带外抑制等核心指标进行解析，并结合选型量化模型与工程化流程，深入分析了电磁兼容性驱动的布局原则及仿真优化方法，最终通过验证评估形成了可靠、完整的实践框架，从而为5G基站射频设计提供了重要的参考依据^[1]。

一、5G 基站中射频单元低插损滤波器件的核心作用

在无线通信系统中，5G 基站射频单元是其核心组件，该单元的性能表现以及滤波器件的插损特性有着非常紧密的关系。在一些高频段的场景中，比如毫米波频段，当信号波长发生大幅缩短

时，便会显著增加路径损耗，而滤波器件内部存在的寄生参数，如等效串联电阻和分布电容，这些因素会导致信号传输衰减进一步加剧。面对这种情况，滤波器件的插损甚至会增加到0.5dB以上，这会直接造成信号覆盖范围被极大压缩，进而对基站的服务半径以及用户的接入质量造成极大影响。对于系统能效来说，因

作者简介：

耿同贺（1989-），男，汉族，河北沧州人，硕士，工程师，主要研究方向：宽带微波组件领域；

姜兆国（1985-），男，汉族，黑龙江哈尔滨人，硕士，高级工程师，主要研究方向：复杂微波组件领域。

为5G基站是采用大规模天线阵列（Massive MIMO）以及高阶调制技术的，所以相比于4G基站的功效要提升3至5倍之多，滤波器件的插损在射频链路的总能量损耗上有着非常直接的贡献。在实际测试中的数据显示，四发四收（4T4R）基站配置中的滤波器件插损从3dB优化到2dB过程中，可使射频前端模块的整体功耗降低约15%，由此可见，其对基站运营成本和能源利用效率的提升具有非常重要的意义^[2]。除此之外，5G基站可以利用Massive MIMO技术来达到空间复用增益的目的，而滤波器件的布局设计则应着重考虑相邻天线通道间所产生的电磁干扰问题。通过采用低插损的滤波器件，能够有效减少信号反射过程中产生的杂散能量，进而降低对邻近天线单元的串扰影响。如果滤波器件插损的降低幅度达到0.5dB时，则相邻通道间的隔离度可以提升至3dB，由此可见，这对保障多天线系统的协同工作性能有着至关重要的影响。通过分析这些特性，5G基站射频单元中低插损滤波器件的作用是非常巨大的，其不仅能够保障信号完整性的基础组件，同时也能使系统能效得到显著提升，而且还能使电磁兼容性得到优化、为高频段的高效通信提供了有力支撑。

二、5G基站射频单元低插损滤波器件的选型

（一）主流滤波器件类型与5G适用性对比

在5G基站射频单元中，需要结合频段的特性来分析主流滤波器件的具体类型与适用性。对于声表面波（SAW）滤波器而言，其是基于压电效应，利用叉指换能器（IDT）激发声波的，在Sub-6GHz频段（如n78/n79）中的表现尤为稳定，其插损可控制在1-2dB范围内，不过其功率容量会受到压电材料特性的限制，一般很难超过10W，因此这种滤波器比较适合中低功率场景。体声波（BAW）滤波器是通过薄膜体声波进行共振，它主要在中高频段，尤其是3GHz - 6GHz频段展现出良好性能^[3]。通常情况下，BAW滤波器的插损可压降至1.5dB以下，功率容量能够提升至20W左右。不过，BAW滤波器的制造工艺较为复杂，涉及到多层薄膜沉积、光刻、刻蚀等高精度工艺步骤，这导致其生产成本较高，约为SAW滤波器的三倍。因此，BAW滤波器比较适合对性能要求较高、成本承受能力较强的中高频段站点。陶瓷介质滤波器利用高介电常数材料，有效减小了器件体积，满足了小型化需求。在毫米波频段，陶瓷介质滤波器能够满足2dB的插损要求，功率容量通常可达30W以上。陶瓷介质滤波器相比传统金属滤波器体积更小，但在毫米波频段，随着频率升高，其尺寸相对较大，可能影响基站设备的紧凑性。在上述三者对比中可以看出，SAW在Sub-6GHz频段中得到了广泛的使用，而BAW则在高频段市场得到了逐步的应用，陶瓷介质在毫米波基站中具有一定的优势，但在尺寸方面存在一定限制，需要在实际应用中合理规划。因此在实际选型过程中，需要对频段覆盖、功率需求与成本预算进行综合性的权衡。

（二）关键性能指标与选型量化模型

在5G基站射频单元中，其系统效能受到滤波器件关键性能指标的直接影响，最核心参数便是插入损耗（IL），特别是在高频段（如毫米波）的场景下，当IL每降低0.1dB时，信号的覆盖范围都可能得到显著提升。除此之外，带外抑制（Rejection）也非常关键，其对滤波器件在邻道干扰的抑制能力有着决定性的影

响，一般要求在 $\pm 1\text{GHz}$ 频偏处需要达到60dBc以上，否则便可能降低接收机的灵敏度。除此之外，基站的发射功率还和功率容量（Power Handling）有着直接的关系，5G基站的峰值功率往往在20W以上，如果器件难以承受，便可能导致非线性失真，所以选择型号时，其功率容量通常要实际需求20%以上。在构建选型量化模型过程中，应将上述指标进行综合，比如采用加权评分法，为IL分配60%的权重，带外抑制30%，成本10%，然后根据实际场景对权重比例进行调整。当然，在实际应用中可能存在一些问题，比如低IL器件的成本往往较高，此时便要对该项指标进行适当放宽。在郊区覆盖场景中，适当降低带外抑制要求往往能够换取更低的IL。最后，模型还需对器件的长期稳定性进行充分考虑，比如IL的效能所受到的温度变化影响，一些器件在高温下IL可能增加0.2dB，因此实际选型时往往要预留一定程度的冗余。总而言之，构建的量化模型已经不再是简单的公式计算，应用过程中往往要结合实际应用场景，对各项指标进行合理的平衡，这样才能使解决方案达到最优的性价比^[4]。

（三）工程化选型流程与验证

5G基站射频单元的工程化选型流程，要兼顾理论指标和实际场景需求。分三步走：第一步是频段匹配。根据基站具体工作频段，比如n78频段的3.4-3.8GHz，筛选候选器件。不同类型的滤波器件，适用频段不同。SAW滤波器适合中低频，但功率有限；BAW滤波器在高频段表现稳定，比如3GHz-6GHz频段，能平衡性能和成本；陶瓷介质滤波器则专攻大带宽毫米波频段。通过明确频段特性，大致锁定候选器件范围。第二步是性能测试。用矢量网络分析仪（VNA）测试插入损耗、带外抑制等关键参数。在5G Sub-6GHz频段，优质BAW器件的插入损耗可降到1.8dB，带外抑制超过65dBc。如果某个参数偏离理论值，比如带外抑制只有58dBc，说明抗干扰能力不够，要把它排除掉。这样能确保选到的器件，满足基站对信号质量、抗干扰的需求。第三步是可靠性验证。通过高温反偏（HTRB）测试，监控器件漏电流的变化率。要求器件在85℃下，持续工作1000小时，评估高温环境中的稳定性和可靠性。同时，做外场实测，分析实际覆盖范围、误码率等业务指标。比如，某基站用了BAW滤波器后，插入损耗从3dB降到1.8dB，覆盖半径扩大12%。这直观显示了器件性能提升，对基站运行效果的影响。实际操作中，要根据情况灵活调整选型策略。高流量区域用户多、业务忙，对信号质量和抗干扰要求高，应优先保障带外抑制等抗干扰指标。偏远场景主要求基本通信覆盖，更看重低插损指标，扩大覆盖范围、降低成本。通过综合考虑各指标，平衡性能和成本，选出最适合5G基站射频单元的滤波器件。

三、5G基站射频单元低插损滤波器件的布局设计优化

（一）电磁兼容性驱动布局原则

对于5G基站射频单元，其布局设计受到电磁兼容性（EMC）的直接影响，因此需要根据滤波器件的位置、走线设计以及屏蔽措施进行针对性考虑。滤波器件靠近天线端能够降低传输过程中的损耗，但如果和敏感组件（如低噪放）的距离较为接近，便可能因空间耦合产生干扰，此时便需要通过金属屏蔽罩进行隔离，

也可对布局进行调整,使滤波器件与敏感组件的距离相对较远。在走线方面,应确保射频线缆的长度最短,比如从滤波器到天线的走线超过10cm,便可能使插损增加,此外,还要避免走线时出现90度拐角,这样会严重影响信号反射。在进行电源和地线布局时同样要予以重视,需确保滤波器件的供电能够独立走线,不能和数字电路共用电源,否则会因共模干扰而导致噪声底限抬升。比如由于某基站在对电源线与射频线进行走线时是采用并行方式的,该原因造成带外杂散超标,经排查后将布线分开才使问题得到解决。当然,在实际布局中往往会因空间限制而出现器件排布紧密的情况,此时便要采用多层PCB结构,将滤波器件置于顶层,而敏感组件则置于底层,中间利用地平面进行隔离。总而言之,EMC驱动的布局需要根据实际场景进行合理的调整,对于高功率基站应更侧重于滤波器件的散热空间,而对于密集城区基站,则应侧重于抑制邻道干扰,通过器件位置、走线优化及屏蔽措施的科学应用,最终实现电磁兼容性与系统性能的平衡。

(二) 仿真驱动的布局优化方法

在对5G基站射频单元进行布局优化时,需要根据电磁场仿真工具来确定仿真驱动方法,然后再构建三维模型,对滤波器件位置进行量化分析、明确走线结构以及屏蔽措施对电磁干扰的影响,从而使整个设计过程具备充足的数据支撑。在仿真过程中,应对精确的器件模型进行构建,模型需涵盖物理尺寸、材料特性及端口参数,然后根据基站的整体结构(如天线阵列、射频前端模块)来构建相应的仿真场景。利用全波仿真技术,能够对滤波器件与敏感组件(如低噪放)的空间耦合强度进行量化,如果仿真结果表明某个频段的耦合度达到-40dB以上时,便需要对滤波器件位置进行调整,也可增加金属屏蔽结构。在进行走线设计时,通过仿真能够对射频线缆长度与路径进行优化,例如将滤波器到天线的走线从15cm缩短至8cm,能够使插损降低至0.3dB,并且避免90度拐角,从而减少了信号反射。在对电源与地线进行布局时,也可通过仿真进行验证,如果发现滤波器件供电线与数字电路出现共模干扰情况时,仿真结果会提示应当独立走线,或者增加磁珠滤波。在优化布局过程中,还往往要结合参数扫描,比如对滤波器件与天线的间距(从5mm增至10mm)进行调整,同时实时观察带外抑制的变化情况,确保实现最小干扰。除此之外,通过仿真还能对高温环境下的性能衰减进行预测,比如在

85℃的极端环境条件下,相比于常温状态下的滤波器件插损可能增加0.2dB,这时便需要在布局过程中对散热空间进行预留,也可对温度稳定性更好的器件进行选择。通过优化仿真驱动,能够使布局设计具备充足的数据支撑,彻底改变以往经验主导的布局方式,这样既能大幅减少实物原型的测试次数,而且还能对电磁兼容性问题进行精准解决,进而保证了滤波器件性能与系统整体效能的最佳匹配。

(三) 布局设计验证与性能评估

在对5G基站射频单元进行布局设计验证以及性能评估时,应当结合实验室测试和现场实测,使电磁兼容性与系统效能得到可靠保证。在实验室阶段,需要利用矢量网络分析仪(VNA)来对滤波器件的插入损耗、带外抑制等核心指标进行测量,以此对设计阈值(如插损 $\leq 2\text{dB}$ 、带外抑制 $\geq 60\text{dBc}$)的符合性进行验证,此外还要通过热成像仪对高温环境下器件的温度变化进行监测,评估散热设计情况,以验证其是否合理。在现场实测时,应利用路测设备对实际覆盖范围、误码率等业务数据进行全面采集,然后对布局优化前后的性能差异进行比对,例如优化后覆盖半径提升10%或误码率降低至0.1%以下。开展性能评估时,应综合仿真结果与实测数据,对电磁干扰(如邻道耦合度是否低于-40dB)、信号完整性及器件稳定性进行分析,并对成本与可维护性(如布局是否便于后期器件更换)进行着重考虑。如果经验证后发现某个频段的带外抑制没有达到理想值,便需要对滤波器件位置进行回溯调整,或者增加相应的屏蔽措施,直到所有指标都能满足要求。经过多维度的验证与评估,保证布局设计既符合理论模型,也能适应实际工程的使用需求。

四、结语

滤波器件作为5G基站射频单元的关键组件,其选型与布局应结合其性能指标、电磁兼容性与工程可行性进行综合考量。本文通过类型对比、指标量化、流程优化及仿真实验,强调低插损、高抑制与稳定性平衡的重要性,进一步明确了动态调整(如频段匹配、散热预留)对实际部署的必要性,从而为5G基站覆盖、能效及可靠性的提升提供了系统化的解决方案。

参考文献

- [1]肖鄂生. 5G信号对微波转频台信号的干扰及抗干扰解决方案[J]. 电视技术, 2024, 48(09): 154-156.
- [2]宋长城, 华浩江, 吴凡. 5G小基站射频前端研究和设计[J]. 电子技术应用, 2024, 50(07): 89-92.
- [3]丁海, 李慧阳, 尤博怀, 等. 5G基站射频滤波器发展和分析[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2024, 36(03): 478-483.
- [4]王娟. 5G基站对微波广播电视发射台信号接收的影响[J]. 电视技术, 2024, 48(06): 140-142.