面向空地高速互联的太赫兹动中通架构与关键技术

Terahertz Communication-on-the-Move Architecture and Key Technologies for Space-Ground High-Speed Interconnection

曹浩一/Cao Haoyi，徐梓鸣/Xu Ziming，
曾泓鑫/Zeng Hongxing，李韦萍/Li Weiping，
张雅鑫/Zhang Yaxing

（电子科技大学，中国 成都 611731）
(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202605002
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20261015.1113.004
网络出版日期：2026-10-15
收稿日期：2026-08-02

摘要：梳理了有源相控阵、无源相控阵和机械伺服3类太赫兹动中通体制，并讨论了2类跟踪技术，包括以四馈源和差单脉冲闭环架构为代表的机械伺服跟踪方案，以及相控阵波束电子扫描方案。通过和差网络形成合通道、方位差通道和俯仰差通道，其中合通道用于通信解调和链路监测，两路差通道经差和比计算后给出有符号二维角误差，以驱动方位—俯仰云台；针对有源相控阵和无源相控阵，提出了学习增强蜂窝周期波束跟踪方法，利用长短期记忆（LSTM）网络预测运动模型残差，采用扩展卡尔曼滤波（EKF）融合导频观测，并通过蜂窝搜索完成低开销波位校正。在收发两端均配置32×32阵列的代表性机动场景中，该方法获得了0.092 5°的径向均方根误差和0.162 2°的95%分位误差。上述两类方法为太赫兹动中通提供了兼顾跟踪范围、训练开销和工程可实现性的技术路径。

关键词：太赫兹通信；动中通；相控阵；波束跟踪；和差单脉冲跟踪

Abstract: Three technical architectures for terahertz communication on the move are reviewed, namely active phased arrays, passive phased arrays, and mechanical servo systems. Two beam-tracking approaches are discussed, including a mechanical servo tracking scheme based on a four-feed sum-and-difference monopulse closed loop and a phased-array electronic beam-scanning scheme. The sum-and-difference network forms a sum channel, an azimuth-difference channel, and an elevation-difference channel. The sum channel is used for communication demodulation and link monitoring, while the two difference channels are processed through difference-over-sum calculation to obtain signed two-dimensional angular errors for driving the azimuth-elevation gimbal. For active and passive phased arrays, a learning-enhanced periodic honeycomb beam-tracking method is proposed. A long short-term memory (LSTM) network predicts motion-model residuals, an extended Kalman filter (EKF) fuses pilot observations, and a honeycomb search performs low-overhead beam-position correction. In a representative maneuvering scenario with 32 × 32 arrays at both the transmitter and receiver, the proposed method achieves a radial root-mean-square error of 0.092 5° and a 95th-percentile error of 0.162 2°. The two approaches provide a technical pathway for terahertz communication on the move that balances tracking range, training overhead, and engineering implementation complexity.

Keywords: terahertz communication; communication on the move; phased array; beam tracking; sum-and-difference monopulse tracking

引用格式：曹浩一，徐梓鸣，曾泓鑫，等．面向空地高速互联的太赫兹动中通架构与关键技术 [J]. 中兴通讯技术，2026, 32(5): 3-12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605002

Citation: Cao H Y, Xu Z M, Zeng H X, et al. Terahertz communication-on-the-move architecture and key technologies for space-ground high-speed interconnection [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(5): 3-12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605002

1 太赫兹动中通的技术挑战与体制分析

空地高速互联是天地一体化信息网络的重要基础，可支撑卫星、无人机及地面移动终端的实时协同。百吉赫兹及太赫兹频段具有丰富的连续频谱资源，可为链路提供吉比特每秒级乃至更高速率的传输能力[1-2]。然而，受发射功率、器件效率、大气吸收及高速传输所需信噪比约束，太赫兹链路通常依赖大口径高增益天线或大规模阵列来补偿链路预算，由此形成窄波束和强空间选择性。高速平移、姿态变化、平台振动及轨迹不确定性引起的微小指向误差，

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFB3207803）；国家自然科学基金项目（62575058，62505038，62471109，U24A20227，62131007，62501165）

可能迅速造成阵列增益下降，甚至导致链路失锁。因此，在持续运动、姿态扰动和短时遮挡条件下实现快速捕获、双端对准、连续跟踪与失锁恢复是太赫兹空地高速互联的核心问题之一。

毫米波系统已形成分层码本、辅助波束对、卡尔曼滤波以及位置和雷达辅助等波束管理方法[2]。相比之下，在相同物理口径下，太赫兹波束更窄，允许的指向误差更小；双端高增益传输还要求发射与接收波束联合对准，使状态空间和训练复杂度进一步增加。全码本遍历会造成较大的训练时延和业务中断，宽波束搜索则牺牲阵列增益与链路裕量；高机动、姿态突变和短时遮挡又会使历史测量及运动先验快速失效。因此，太赫兹动中通需要在跟踪精度、训练开销、控制时延和失锁恢复能力之间进行联合权衡。

现有研究已验证太赫兹相控阵前端、电子扫描和高速数据传输的可行性[3-4]，但多数工作仍集中于静态或准静态条件下的器件性能、峰值速率或单项跟踪功能。面向双端移动和复杂姿态，将捕获、跟踪、业务传输、链路监测与失锁恢复纳入统一闭环的研究仍较有限。从波束形成与传播调控机制看，太赫兹动中通主要包括有源相控阵、无源相控阵（可重构智能表面）辅助反射和机械伺服3类技术路径。有源相控阵通过阵元幅相控制实现对高速移动平台的高速电子扫描，适合精细对准和连续跟踪；低空无人机作为中介，利用无源相控阵拓展覆盖范围，通过调节无源相控阵亚波长单元状态来重构传播路径，指向密集楼宇覆盖、有源相控阵无法视距传输抵达的各个移动端子用户，实现遮挡绕行、覆盖补盲和链路增强，实现小区多用户覆盖；机械伺服通过云台或转台驱动大口径天线实现大范围高增益指向，但受机械惯性和控制带宽限制。3类体制具有互补性：机械伺服负责粗指向，有源相控阵承担高速细跟踪，无源相控阵在直达链路受阻或链路裕量不足时提供辅助路径，如图1所示。3种体制的详细对比如表1所示。

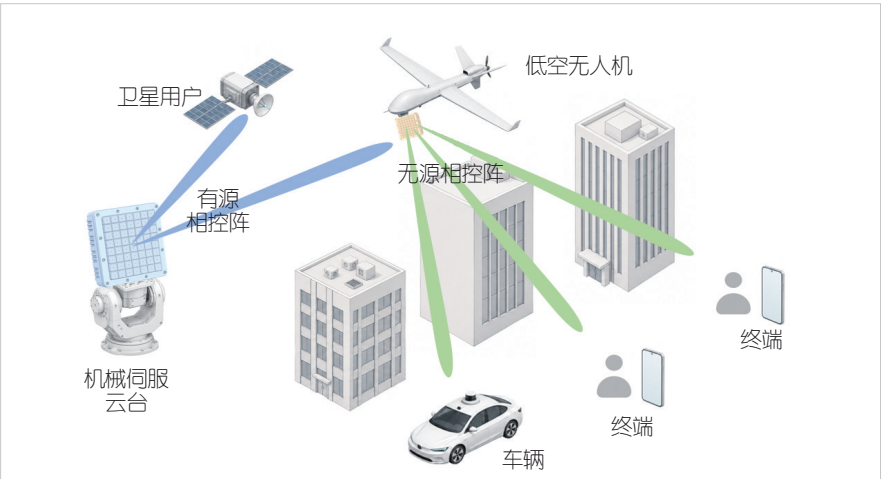
本文首先分析3类动中通体制的工作原理、系统架构和动态波束管理机制，随后给出四馈源和差波束测角链路、机械伺服闭环跟踪与失锁重捕获方法，以及面向有源相控阵和无源相控阵辅助链路的学习增强蜂窝周期波束跟踪方法，最后讨论多体制协同和感知辅助的发展趋势。

2 基于有源相控阵的太赫兹动中通技术

2.1 工作原理

有源相控阵通过独立或分组控制阵元或子阵通道的幅相状态，使辐射场在目标方向相干叠加，从而提高发射等效全向辐射功率和接收阵列增益。发射时，各通道补偿空间相位差以形成窄波束；接收时，按对应相位关系完成相干合并。更新幅相控制字即可实现电子扫描，无须转动天线本体。

典型前端由通信与波束控制、射频变频、多通道幅相



注：蓝色窄波束表示机械伺服辅助下的有源相控阵电子跟踪链路，绿色波束表示无源相控阵辅助可重构反射链路

图1 太赫兹动中通3类技术体制及跟踪架构示意图

表1 3类太赫兹动中通体制对比

比较维度	有源相控阵	无源相控阵	机械伺服
调控方式	阵元或子阵幅相主动控制	被动单元相位、幅度或极化调控	云台或转台机械转动
信号产生与放大	可产生、放大并完成收发一体化	不产生通信信号，不提供主动增益	依赖外部收发机
扫描与跟踪速度	高，支持电子扫描和快速更新	受刷新速率及控制链路限制	受机械惯性和控制带宽限制
典型覆盖用途	精细对准、连续跟踪和双端波束管理	遮挡绕行、覆盖补盲和链路增强	大范围粗指向和高增益覆盖
主要约束	射频链路复杂度、功耗和通道校准	两段传播损耗、反射效率、相位量化和宽带色散	机械惯性、回差和结构模态
跟踪机制	码本搜索、局部扫描和预测融合	由主动收发节点驱动联合搜索	和差单脉冲测角与编码器闭环

调控和阵列天线组成，如图2（a）所示。发射信号经变频、放大和幅相加权后送入阵列；接收信号经低噪声放大、合成和下变频后送入基带。波控板依据目标方向、码本或跟踪结果刷新控制字，使通信处理、导频测量和波束更新形成闭环。相较于机械伺服，有源相控阵可快速完成方向更新，并支持邻域探测和双端交替训练。

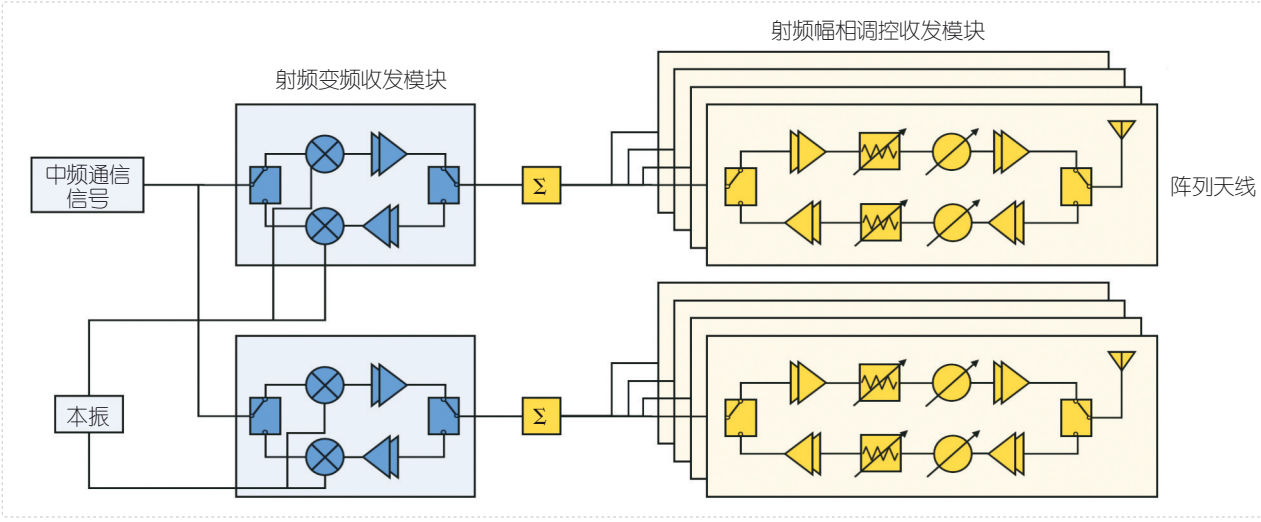
2.2 基于有源相控阵的时分双工动中通架构

图2（b）给出了时分双工（TDD）架构。节点A和节点B均配置太赫兹相控阵收发前端及通信和波束控制板，并在同一载频上交替收发。帧内保护间隔用于收发切换和控制字刷新，导频用于同步、信道估计及候选波束的参考信号接收功率（RSSI）、参考信号接收质量（RSRP）或相关能量测量。跟踪导频可独立设置，也可周期嵌入业务帧，以平衡更新速率和有效数据占比。

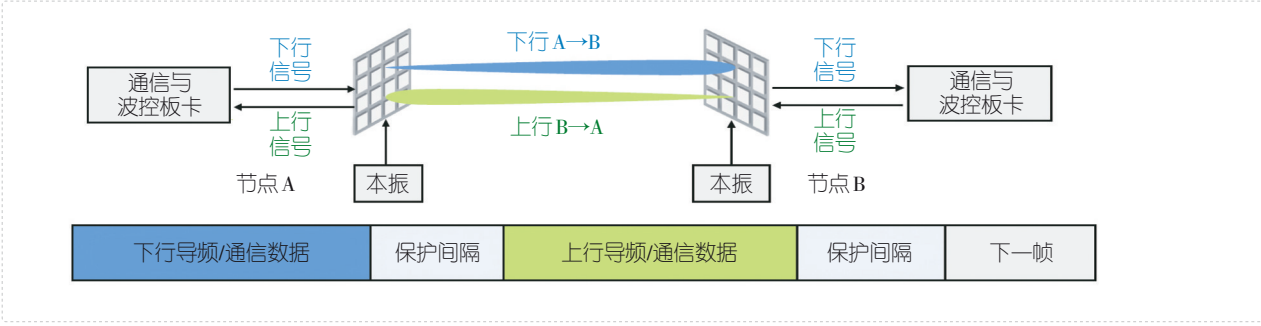
太赫兹链路依赖收发双端的高增益窄波束，任意一端出现指向偏差都会降低等效链路增益。TDD传播信道在相邻时隙内近似互易，因此节点B在下行阶段获得的到达方向可作为下一上行发射方向的先验，节点A在上行阶段得到的方向也可映射为下一下行发射方向。两端通过交换最优波束索引、邻域功率、预测角度和失锁状态形成双端闭环。传播信道互易并不意味着射频链路完全互易，实际系统仍需校准收发通道的幅相偏置和时延误差。

2.3 收发双端联合对准与动态波束管理

有源相控阵波束管理包括初始捕获、稳态跟踪、链路监测和失锁重捕获。初始捕获阶段缺少可靠的方向先验，需要在较大角域内搜索收发波束组合。全码本遍历可靠性较高，但训练开销随两端码本规模乘积增长；分层码本可先用宽波束确定目标扇区，再以窄波束完成精细对准[5]。位



（a）多通道幅相调控相控阵收发前端



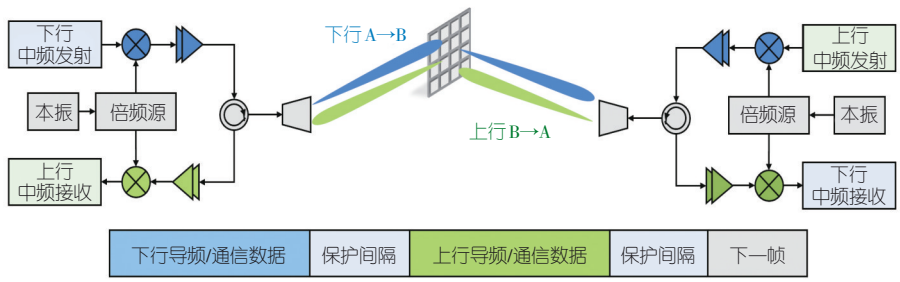
（b）基于有源相控阵的双向通信及帧结构

注：蓝色和绿色波束分别表示不同时隙中的下行链路和上行链路，不表示两个方向同时传输

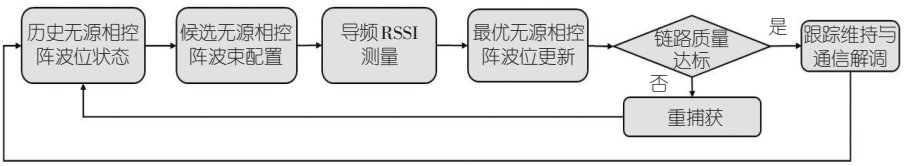
图2　基于有源相控阵的太赫兹时分双工动中通系统

置、姿态、雷达及其他频段信息可进一步压缩搜索范围[6]。

完成粗对准后，系统围绕上一时刻最优波束或预测波位进行局部跟踪。其中，扫描搜索通过比较候选波束导频功率确定最优波位；模型驱动方法通过卡尔曼滤波等方法预测下一波位，但固定模型在急转、振动和遮挡条件下容易失配；数据驱动方法则利用历史波束、链路功率、位置和姿态序列学习非线性运动规律[7-9]。较稳健的实现方式是由预测模型给出候选中心和不确定度，再通过少量真实导频完成局部验证。系统还可联合接收功率、导频相关峰值、误差矢量幅度和误码率监测链路，并在候选点连续位于边界或整体功率骤降时扩大搜索范围或触发重捕获。



(a)节点A和节点B经无源相控阵建立的双向反射链路及帧结构



(b)基于时分双工信道互易性的有源/无源相控阵协同波束跟踪与重捕获流程

RSSI:参考信号接受率

图3 基于无源相控阵的太赫兹时分双工双向动中通系统

3 基于无源相控阵的太赫兹动中通技术

3.1 工作原理

无源相控阵由大量亚波长单元构成，通过调控相位、幅度或极化形成可重构传播路径[10]。与有源相控阵不同，无源相控阵不主动产生通信信号，而是改变阵面电磁边界条件，实现入射与反射方向的可编程映射。其阵面功耗低、易于共形部署，适合在直达链路受阻或链路裕量不足时提供绕障、补盲和增强[10-11]；但级联链路需经历两段传播损耗，并受到反射效率、相位量化、宽带色散和刷新速度限制。

3.2 基于无源相控阵的时分双工动中通架构

图3（a）所示系统由两端主动收发节点和中间无源相控阵组成。下行时节点A发射，信号经无源相控阵反射后到达节点B；上行时两端角色互换。无源相控阵控制器依据入射方向、反射方向和级联链路测量选择阵面状态，使各单元信号在接收方向相干叠加。导频用于比较不同终端波束和阵面配置下的RSSI、RSRP或相关能量，并将结果反馈至无源相控阵控制器。当系统采用同频TDD、阵面响应满足互易性且上下行间隔较短时，下行最优阵面状态和接收方向可作为上行先验，反向测量则用于修正下一下行配置。若两端配置有源相控阵，系统需要联合维护发射波束、无源相控阵反射状态和接收波束。

3.3 无源相控阵协同与动态波束管理

无源相控阵通常不具备独立发送导频和测量链路质量的能力，其动态控制依赖两端主动节点。每个跟踪周期首先依据历史主动波束、无源相控阵状态、运动轨迹和链路质量生成局部候选配置，随后在TDD导频时隙内测试并选择最优联合配置。链路质量低于门限时，系统扩大搜索范围或触发重捕获。对于固定无源相控阵，可重点更新反射方向和移动终端波束；对于机载或星载无源相控阵，入射方向、反射方向和阵面姿态均随平台运动变化，需要融合位置、姿态和惯导信息。因此，无源相控阵并非独立跟踪主体，而是由主动收发节点驱动的传播环境重构单元。

4 基于机械伺服系统的太赫兹动中通技术

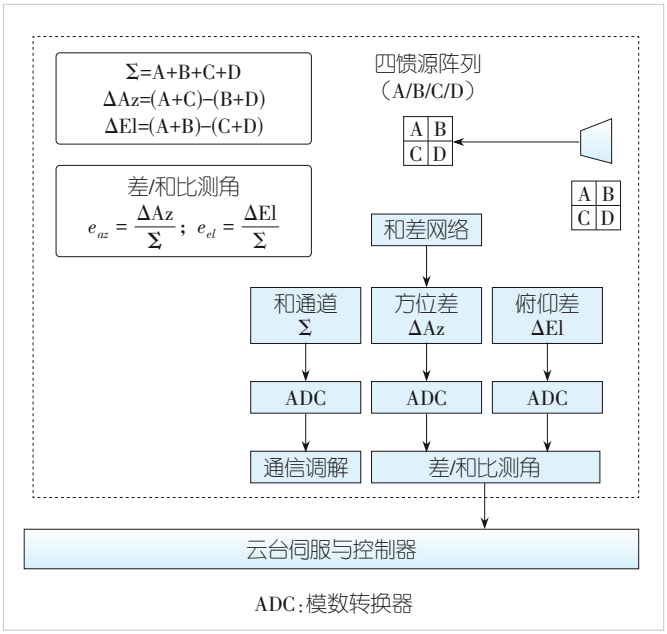
机械伺服适用于需要大口径、高增益和大范围指向能力的太赫兹终端，其关键是从极窄波束中连续获得方向明确的二维失准量。幅度比较单脉冲方法利用空间对称布置的多个馈源，在同一次接收中同时形成和波束与两路正交差波束，因此能够在主瓣附近直接判断偏差方向，而不必在稳定跟踪阶段反复转动天线进行试探。

本文以单个终端的四馈源和差闭环作为基本跟踪单元。

接收信号经和差网络分成Σ、ΔAz和ΔEl 3路：Σ支路承担通信解调并提供接收功率、信噪比等质量指标，两路差支路给出方位和俯仰偏差的方向信息；差和比测角结果送入云台伺服与控制器，编码器反馈则构成机械内环。对于双端高增益链路，两端可各自配置相同的接收跟踪单元，并在本端接收时独立校正电轴，从而使复杂的双端对准问题分解为两个结构相同的单端闭环。

4.1 四馈源和差波束测角与闭环跟踪

图4给出了四馈源和差波束的信号处理链路。4个馈源按左上A、右上B、左下C和右下D布置，其接收电压经和差网络组合为Σ=A+B+C+D、ΔAz=（A+C）−（B+D）和ΔEl=（A+B）−（C+D）。当目标位于天线电轴上时，四路信号近似等幅同相，Σ相干叠加，而两路差输出接近零；目标向左或向右偏离时，ΔAz的幅度与符号随之变化，目标向上或向下偏离时，ΔEl作相应变化。围绕太赫兹和差通道的形成，现有研究主要从降低馈电损耗、改善收发隔离、拓展工作带宽和提高结构集成度等方面展开。220 GHz原型采用准平面3 dB耦合器与相位补偿传输线实现和差合成[12]；五单元收发分离方案以中心馈源承担发射和通道、外围四馈源形成接收和/差通道，从而避免使用环行器[13]；准光学馈电网络通过光程差补偿和反射相位校正兼顾工作带宽与插入损耗[14]；双频圆极化方案则采用转门正交模耦合器和180°移相器形成两路差通道，并以免匹配负载结构简化馈电网络[15]。上述方案面向的工作频段、极化方式和收发架构不同，工程选型仍需综合权衡带宽、损耗、通道隔离、加工装调难度及系统集成条件。



ADC：模数转换器

图4　四馈源和差网络、三通道接收与机械伺服闭环

和差网络之后，Σ、ΔAz和ΔEl分别进入同步接收和模数转换通道。Σ通道送往通信解调器，同时输出接收功率和信噪比；两个差通道保持与Σ通道一致的频率、相位参考和采样时刻。经幅相校正后，处理器计算差信号相对于和信号的归一化比值。该比值削弱了发射功率、传播损耗和慢衰落对三路信号的共同影响，并保留了目标偏离电轴的方向信息。处理器据此生成方位和俯仰修正量，云台转动后重新采样三路信号，形成“测角–转动–再测角”的连续射频闭环。

设幅相校正后的和通道、方位差通道和俯仰差通道分别为fΣ、ΔAz和ΔEl。在Σ高于有效测量门限且差和比位于标定线性区时，两轴归一化误差信号可写为：

$$e_{\mathrm{Az}}=\frac{\Delta_{\mathrm{Az}}}{\Sigma},e_{\mathrm{El}}=\frac{\Delta_{\mathrm{El}}}{\Sigma} \tag{1}$$

由于馈源、和差网络、接收机和机械安装会引入增益不一致、零点偏移及两轴耦合，差和比不能直接等同于真实角度。通过暗室二维扫描得到斜率矩阵$\boldsymbol{K}$和零偏向量$\boldsymbol{b}$后，可将归一化误差换算为方位—俯仰角误差：

$$\boldsymbol{e}=\begin{bmatrix}e_{\mathrm{Az}}\\e_{\mathrm{El}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\delta}=\boldsymbol{K}^{-1}(\boldsymbol{e}-\boldsymbol{b}) \tag{2}$$

公式（1）的两项分别表示方位与俯仰差和比；公式（2）中的$\boldsymbol{e}$为归一化误差向量，$\boldsymbol{\delta}$为标定后的二维指向误差。控制器根据$\boldsymbol{\delta}$生成云台位置或角速度指令，编码器内环负责跟随指令并抑制机械扰动。实际处理时，只在Σ通道质量合格、差和比未饱和且三通道时序一致时更新控制量；若测量无效，则暂停积分或保持上一指令，以避免弱信号和通道不平衡驱动云台偏离。

4.2 失锁判定与重捕获

和差波束只能在主瓣零轴附近提供单调的差和比，因此其精跟踪范围明显小于云台的机械转动范围。系统不应依据单帧功率波动立即宣布失锁，而应联合3类信息进行连续判决：一是Σ通道功率或信噪比连续多帧低于退出门限；二是任一轴差和比的绝对值超出标定线性区，或出现饱和、符号异常跳变；三是云台编码器残差持续增大，或执行机构到达速度、位置限制。进入失锁状态后，控制器冻结积分项，短时间保持末次有效指向，并继续采样Σ通道，以排除瞬时遮挡、深衰落或单个异常采样造成的误判。进入跟踪和退出跟踪采用不同门限，并要求连续若干帧满

足条件，可减少锁定状态在门限附近反复切换。

若链路在保持阶段没有恢复，重捕获首先以末次有效指向为中心，并结合失锁前的角速度、编码器状态或惯导信息预测一个新的搜索中心。云台先执行小范围十字、螺旋或栅格搜索，搜索步长应小于可用线性测角区，使相邻驻留点之间保留波束重叠；每个候选方向均短时驻留，以Σ通道判断是否重新发现目标。当Σ连续超过捕获门限、两路差和比同时落入线性区且通道一致性正常时，系统将当前方向作为新的粗对准点，清零或限幅积分状态，并以渐进增益恢复和差闭环。若局部搜索失败，则逐级扩大半径，并调用任务预置方向、全球导航卫星系统（GNSS）或惯导信息重新完成大范围粗指向。对于双端链路，宜采用交错重捕获：一端暂时保持或缓慢预测指向，另一端先搜索并建立接收锁定，随后交换角色，以避免两端同时快速扫描而长期错过彼此。

4.3 工程实现要点

和差机械跟瞄精度取决于差波束零陷深度、Δ/Σ斜率、三通道信噪比、幅相一致性、采样同步、闭环总时延以及云台回差和结构模态。文献[12]的实测结果表明，220 GHz高增益天线能够形成0.18°量级的窄主瓣和超过35 dB的差波束零陷，这既提高了零轴附近的测角灵敏度，也压缩了允许粗指向误差的范围。工程上应在暗室内获得覆盖工作频带、温度和典型姿态的二维差和比标定图，校正四馈源及三接收通道的增益、相位、时延、零偏和两轴耦合；模数转换器（ADC）应共用时钟与触发基准，避免异步采样把平台运动误认为角误差。伺服带宽需避开主要结构谐振并保留相位裕量，同时配置限速、限加速度和抗积分饱和。多径或遮挡会破坏差和比的单调性，应联合Σ功率、信噪比（SNR）、差和比一致性和编码器残差进行质量判决。评价时除稳态角误差外，还应报告线性捕获区、闭环带宽、失锁概率、重捕获时间以及误码率（BER）、误差矢量幅度（EVM）、吞吐量和中断时长等端到端指标。

5 面向相控阵的学习增强蜂窝周期波束跟踪方法

5.1 总体架构与问题建模

有源相控阵和无源相控阵辅助链路可共享预测驱动的局部跟踪框架：有源相控阵直接切换收发波束，无源相控阵辅助链路则将候选波位映射为终端波束、反射方向和局部阵面状态。针对窄波束易失配和全空间扫描开销高的问题，本文提出学习增强蜂窝周期波束跟踪方法。该方法以长短期记忆网络（LSTM）估计固定运动模型未描述的非线性残差及其不确定度，以扩展卡尔曼滤波（EKF）完成状态递推和导频融合，并通过七点蜂窝搜索获得低开销局部观测。完整流程包括状态预测、候选生成、TDD导频测量、功率面拟合、创新门控、状态更新和失锁重捕获，如图5

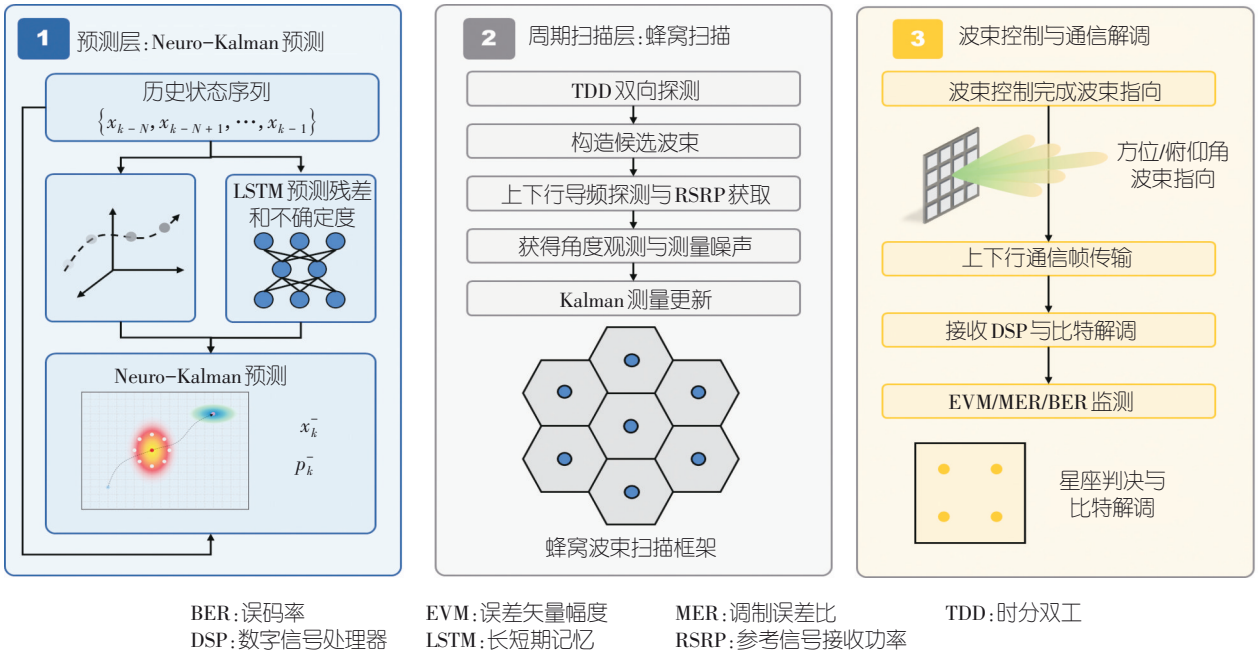


图5　学习增强蜂窝周期波束跟踪方法的完整流程

所示。

我们将局部波束跟踪抽象为统一问题：已知上一帧最优波位或预测波位，在有限候选集合中选择当前最优波束，使接收功率、导频相关评分或等效信噪比最大。设第 $t-1$ 帧的参考波位为 $\hat{\boldsymbol{p}}_{t-1}=\left(\hat{x}_{t-1},\hat{y}_{t-1}\right)^{\mathrm{T}}$，其中 $\hat{x}$ 和 $\hat{y}$ 分别表示方位角和俯仰角。当前帧的候选集合为 $\mathcal{S}_t$，则波束选择可写为：

$$\hat{\boldsymbol{p}}_t=\underset{\boldsymbol{p}_i\in\mathcal{S}_t}{\arg\max}\,J\left(\boldsymbol{p}_i\right) \tag{3}$$

其中，$J\left(\boldsymbol{p}_i\right)$ 可由 RSRP、RSSI 或归一化导频相关能量给出。

5.2 Neuro-Kalman 学习增强预测

深度网络可用于补偿传统运动模型难以刻画的非线性波束动态[7-9,16-19]。本文将方位角、俯仰角及两轴角速度构成4维状态。常速度模型先外推视线方向，LSTM 根据最近16个周期的状态序列估计状态转移残差及不确定度，EKF 再融合运动先验与导频观测。网络由两层 LSTM 和两层全连接层组成，输入和隐藏维度分别为4和48，输出残差均值及对数方差。LSTM 仅补偿转弯、突发角加速度和非规则振动引起的模型偏差；导频质量下降时，系统依靠预测维持短时连续性，测量恢复后再快速收敛。

5.3 七点蜂窝周期测量与 TDD 闭环

七点蜂窝以预测波位为中心，在二维角域设置中心点和6个等半径邻点，以较少候选获得近似各向同性的局部覆盖，并可直接映射为相控阵控制字。系统在控制周期内持续预测，仅在测量周期执行七点导频验证。搜索半径由预测协方差、角速度和链路质量调节[20]：稳定阶段缩小，不确定度增大或重捕获时扩大。

每个候选波束使用导频完成信道与功率测量，并以加权质心确定最佳角度。相关峰值选择可表述为：对每个候选波束接收导频序列 $r_i[n]$，与本地参考序列 $s[n]$ 计算归一化相关评分：

$$J_i=\frac{\left|\sum_{n=0}^{N-1}r_i[n]s^{*}[n]\right|^2}{\left(\sum_{n=0}^{N-1}\left|r_i[n]\right|^2\right)\left(\sum_{n=0}^{N-1}\left|s[n]\right|^2\right)+\varepsilon} \tag{4}$$

候选测量采用 Gold 序列并映射为正交相移键控导频。接收端通过相关估计获得各候选波束的 RSRP，收发双方采用 TDD 交替测量，对7个角度—功率样本进行拟合，恢复连续角域峰值及测量置信度。

5.4 仿真设置与性能分析

物理层采用 32×32 矩形相控阵，频率设置为 100 GHz，单元间距为半波长。通信波形为 2 Gbaud 单载波正交相移键控（QPSK），帧结构由 127 符号导频和 2 048 符号数据组成；信道估计和均衡分别采用最小二乘和最小均方误差方法。对比方法包括 1 024 点遍历扫描、4×4 局部栅格、16 点螺旋扫描、常速度模型卡尔曼滤波（CV-KF）结合七点蜂窝，以及本文 Neuro-Kalman 结合蜂窝扫描。仿真时长为 24 s，代表性机动轨迹包含连续转向、角速度变化和 7.6 ~ 8.4 s 的弱测量区间。角度预测和波束命令每 20 ms 更新一次，每 5 次更新执行一次双向七点蜂窝扫描，因此扫描周期为 100 ms。周期扫描空口占用率可表示为：

$$\eta_{\mathrm{scan}}=\frac{2N_{\mathrm{scan}}\left(T_{\mathrm{sw}}+\dfrac{L_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{s}}}\right)+2T_{\mathrm{g}}+T_{\mathrm{c}}}{T_{\mathrm{scan}}}\times100\% \tag{5}$$

其中，$N_{\mathrm{scan}}=7$ 为单向候选波位数，$T_{\mathrm{sw}}=20\ \mu\mathrm{s}$ 为波束切换时间，$L_{\mathrm{p}}=127$ 为导频符号数，$R_{\mathrm{s}}=2$ Gbaud 为符号率，$T_{\mathrm{g}}=20\ \mu\mathrm{s}$ 为单个保护间隔，$T_{\mathrm{c}}=100\ \mu\mathrm{s}$ 为设定的控制处理时间预算。因此，单次双向扫描时隙为 420.889 μs，周期扫描空口占用率约为 0.421%，该值为依据设定帧参数得到的解析估算，不包含业务帧内导频、额外重捕获和实际处理时延。

图6表明，本文方法在平稳段能够跟随真实方位角和俯仰角；在弱测量区间仍可依靠预测先验维持连续指向，并在测量恢复后快速修正漂移。图7显示，Neuro-Kalman 结合七点蜂窝的径向均方根误差、95% 分位误差和最大误差分别为 0.092 5°、0.162 2° 和 0.522 9°；CV-KF 蜂窝方法对应指标分别为 0.100 4°、0.168 3° 和 0.603 9°。相比局部栅格、遍历和螺旋扫描，本文方法在弱测量区间后的误差恢复更快，且未越过仿真设置的失锁判定线。

如图8所示，指向误差的降低能够直接转化为链路质量稳定性。本文方法的 RSRP 为 -56.24 dBm；QPSK 数据段的平均 EVM 为 19.51%。以 BER 超过 0.001 作为超限条件，其超限比例为 0.87%，低于 CV-KF 蜂窝方法的 0.96%、局部栅格的 2.78%、遍历扫描的 3.13% 和螺旋扫描的 8.51%。

6 未来技术发展趋势

单一波束控制体制难以同时满足太赫兹动中通对大范围捕获、高速精细跟踪和遮挡恢复的要求，未来系统将向有源相控阵、无源相控阵和机械伺服协同演进。机械伺服

负责大范围粗指向，有源相控阵完成高速电子细跟踪和姿态扰动补偿，无源相控阵则在直达链路受阻或链路裕量下降时重构反射路径。三者可形成多时间尺度闭环，并通过直达/反射链路切换和分级重捕获提高链路连续性。

系统还将由单一通信导频反馈转向和差射频角误差、雷达、GPS/GNSS、惯导和历史链路状态的协同感知。不同信息源经时间同步、坐标转换和置信度评估后，可为机械转台、主动波束和无源相控阵状态提供前视先验；其中机械终端可由位置/惯导完成大范围预指向，再由和差单脉冲消除射频电轴残差。进一步地，LSTM、Transformer及神经网络辅助卡尔曼滤波可用于方向预测、候选波束生成、搜索范围调整和失锁风险判断，形成“多源感知—智能预测—机械粗指向—和差射频精跟踪/有源相控阵细跟踪—通信验证—异常重捕获”的闭环。未来还需解决多源信息同步、跨坐标系标定、模型泛化、实时算力和可靠控制等问题。

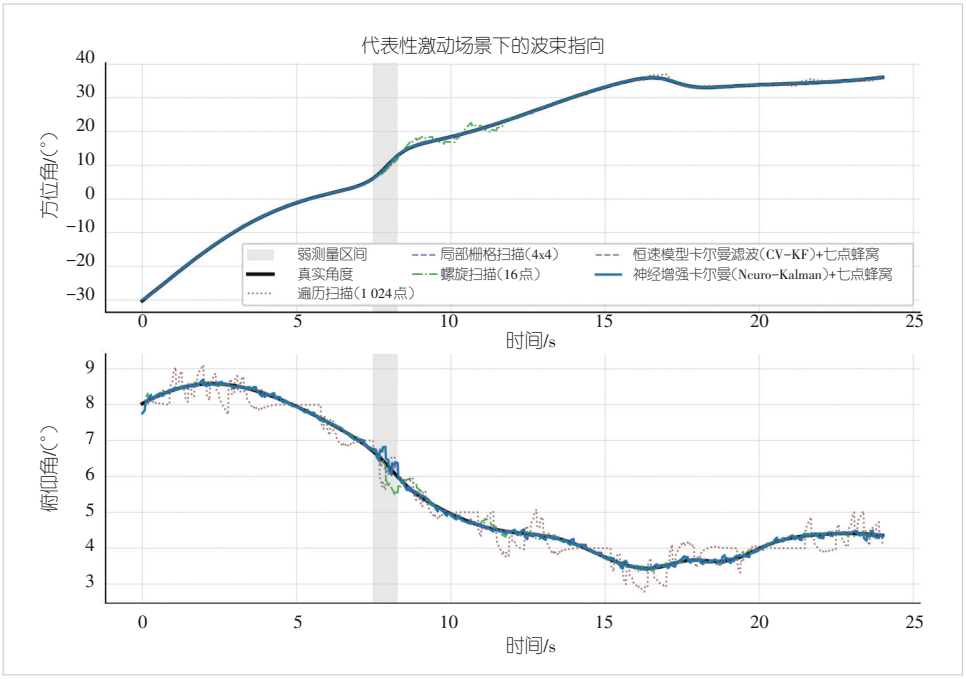


图6　代表性机动场景下的方位角与俯仰角波束跟踪结果

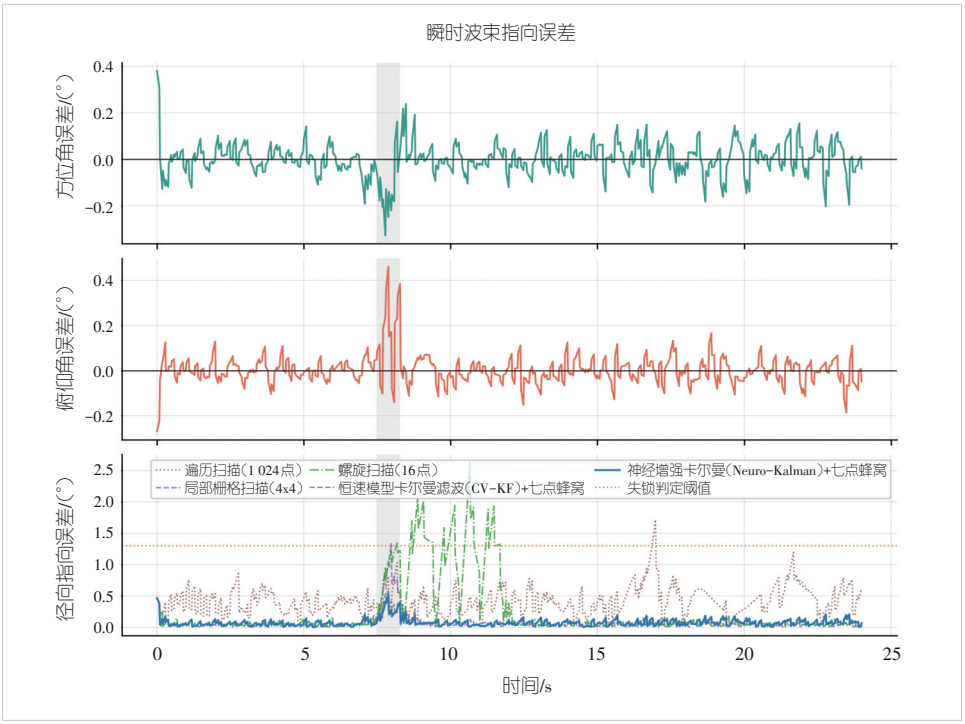


图7　Neuro-Kalman蜂窝跟踪的瞬时两轴误差及不同方法的径向指向误差

7 结束语

本文面向空地高速互联中的太赫兹窄波束动态保持问题，分析了有源相控阵、无源相控阵辅助反射和机械伺服3类动中通技术的工作原理、通信架构与动态管理机制。针对机械伺服，构建四馈源和差波束跟瞄链路，利用Σ、ΔAz和ΔEl同步观测获得差和比，并通过二维标定恢复有符号角误差，形成射频测角外环与编码器伺服内环；同时给出由连续失锁判决、末次指向保持、局部搜索和逐级扩展组成的重捕获方法。针对有源相控阵和无源相控阵辅助链路，提出融合LSTM残差预测、卡尔曼滤波递推与七点蜂窝局部搜索的周期跟踪方法，获得0.092 5°的径向均方根误差、0.162 2°的95%分位误差和0.421%的周期训练开销。两类方法分别发挥机械大范围转向与单脉冲局部精测角、电子波束快速切换与学习预测的优势。通过有源相控阵、无源

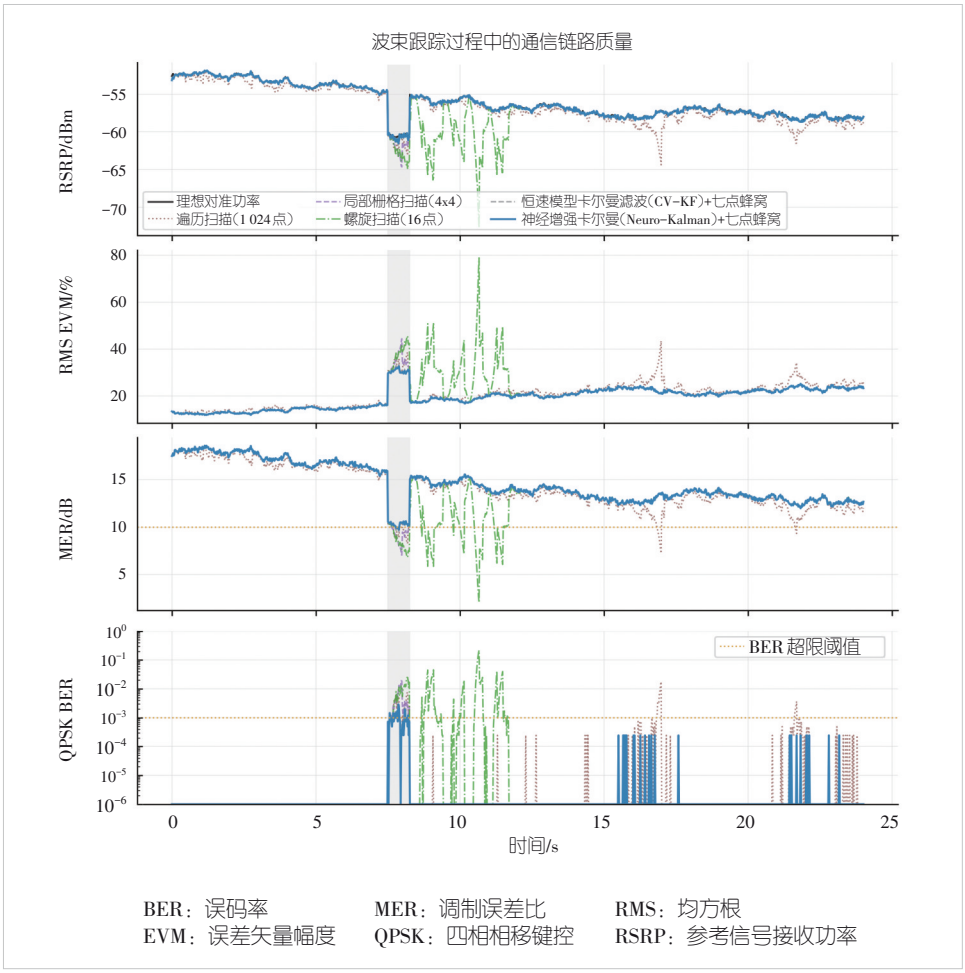


图8　波束跟踪过程中的导频功率、EVM、MER与通信误码率

相控阵、机械伺服和多源感知协同，可进一步提升高速机动、姿态扰动和遮挡条件下太赫兹链路的捕获、跟踪与恢复能力，为空地一体化高速通信网络提供技术支撑。

参考文献

[1] You X H, Wang C X, Huang J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China information sciences, 2021, 64: 110301. DOI: 10.1007/s11432-020-2955-6

[2] Xue Q, Ji C W, Ma S D, et al. A survey of beam management for mmWave and THz communications towards 6G [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2024, 26(3): 1520-1559. DOI: 10.1109/comst.2024.3361991

[3] Askar R, Chung J, John L, et al. Mobilizing the terahertz beam: d-band analog-beamforming front-end prototyping and long-range 6G trials [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(6): 110-117. DOI: 10.1109/mwc.002.2400005

[4] Cao H Y, Wang Z, Wang W P, et al. Demonstration of tracking and communication based on sub-terahertz phased-array system for next-generation intelligent mobile scenarios [J]. Science China information sciences, 2026, 69(5): 150306. DOI: 10.1007/s11432-025-4879-4

[5] Qi C H, Chen K J, Dobre O A, et al. Hierarchical codebook-based multiuser beam training for millimeter wave massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(12): 8142-8152. DOI: 10.1109/twc.2020.3019523

[6] Ali A, González-Prelcic N, Heath R W. Millimeter wave beam-selection using out-of-band spatial information [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(2): 1038-1052. DOI: 10.1109/twc.2017.2773532

[7] Va V, Vikalo H, Heath R W. Beam tracking for mobile millimeter wave communication systems [C]// Proceedings of IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2016: 743-747. DOI: 10.1109/globalsip.2016.7905941

[8] Lim S H, Kim S, Shim B, et al. Deep learning-based beam tracking for millimeter-wave communications under mobility [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(11): 7458-7469. DOI: 10.1109/tcomm.2021.3107526

[9] Revach G, Shlezinger N, Ni X Y, et al. KalmanNet: neural network aided Kalman filtering for partially known dynamics [J]. IEEE transactions on signal processing, 2022, 70: 1532-1547. DOI: 10.1109/tsp.2022.3158588

[10] Basar E, Di Renzo M, De Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019, 7: 116753-116773. DOI: 10.1109/access.2019.2935192

[11] Singh A, Petrov V, Guerboukha H, et al. Wavefront engineering: realizing efficient terahertz band communications in 6G and beyond [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(3): 133-139. DOI: 10.1109/mwc.019.2200583

[12] Zhu Z B, Hu W D, Li S, et al. A 220GHz mono-pulse beam adaptive self-tracking antenna for long distance communication applications [C]//Proceedings of 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2022: 1-2. DOI: 10.1109/irmmw-thz50927.2022.9895608

[13] Wang Y H, Xiang S J, Chen Y, et al. A transmit - receive separation scheme of monopulse antenna applied in the terahertz band [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2025, 24(1): 152-156. DOI: 10.1109/lawp.2024.3487199

[14] Hu B, Li H, Wang H Y, et al. Terahertz quasi-optical broadband monopulse feed network technology [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2025, 24(12): 4845-4849. DOI: 10.1109/lawp.2025.3613698

[15] Zhu Z B, Zheng Z W, Wang C X, et al. Terahertz circularly polarized monopulse cassegrain antenna with load-matching-

free feed network [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2026, 25(5): 2175-2179. DOI: 10.1109/lawp.2026.3674167
[16] Burghal D, Abbasi N A, Molisch A F. A machine learning solution for beam tracking in mmWave systems [C]//Proceedings of 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2019: 173-177. DOI: 10.1109/ieeeconf44664.2019.9048770
[17] Yan L, Fang X M, Fang Y G, et al. KF-LSTM based beam tracking for UAV-assisted mmWave HSR wireless networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 71(10): 10796-10807. DOI: 10.1109/tvt.2022.3187978
[18] Liang C T, Kuang J S, Wu F, et al. Millimetre-wave beam tracking: an intelligent machine learning and Kalman filter fusion technology [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2024, 10(2): 487-498. DOI: 10.1109/tccn.2023.3334206
[19] Wang P Y, Ma K, Bai Y S, et al. Deep learning assisted mmWave beam prediction with flexible network architecture [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2025, 24(11): 9435-9448. DOI: 10.1109/twc.2025.3573327
[20] Liu C S, Li M, Zhao L, et al. Robust adaptive beam tracking for mobile millimetre wave communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(3): 1918-1934. DOI: 10.1109/twc.2020.3037552

作 者 简 介



曹浩一，电子科技大学电子科学与工程学院在读博士研究生；主要研究方向为全固态太赫兹通信系统、毫米波/太赫兹相控阵跟瞄技术。



徐梓鸣，电子科技大学电子科学与工程学院在读博士研究生；主要研究方向为全固态太赫兹通信系统、毫米波/太赫兹多模态跟瞄技术。



曾泓鑫，电子科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师；研究方向为太赫兹功能芯片、太赫兹全固态功能模块及太赫兹全固态通信系统等。



李韦萍，电子科技大学电子科学与工程学院研究员、博士生导师；研究方向为光电融合太赫兹通信系统、数字信号处理技术等。



张雅鑫，电子科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师；研究方向为太赫兹功能芯片、太赫兹全固态功能模块及太赫兹全固态通信系统等。