

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—XXXX

基于太赫兹通信的近距离通信单兵装备高速 互联技术规范

Technical specification for high-speed interconnection of individual soldier
equipment in short-range communication based on terahertz communication

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

前 言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 略缩语	2
5 总体要求	3
5.1 一般要求	3
5.2 系统功能要求	3
5.3 信息安全要求	3
5.4 设备安全要求	4
5.5 安全与伦理要求	4
6 系统架构	4
7 设计要求	4
7.1 总体设计要求	4
7.5 软件与算法要求	6
8 材料与模块要求	8
8.1 材料要求	8
8.2 太赫兹收发模块要求	8
8.3 互联接口要求	8
9 性能要求	9
9.1 电气性能	9
9.2 通信性能	10
9.3 环境适应性	10
9.4 力学性能	10
9.5 可靠性	10
9.6 电磁兼容性	10
10 试验方法	11
10.1 电气性能试验	11
10.2 通信性能试验	12
10.3 通信性能试验	12
10.4 环境适应性试验	14
10.5 环境适应性试验	错误! 未定义书签。
10.6 力学性能	14
10.7 电磁兼容性	14

11 检验规则	14
11.1 检验分类	14
11.2 出厂检验	14
11.3 型式检验	14
12 标志、包装、运输和贮存	15

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

基于太赫兹通信的近距离通信单兵装备高速互联技术规范

1 范围

本文件规定了基于太赫兹通信的近距离通信单兵装备高速互联的总体要求、系统架构、设计要求、材料与模块要求、性能要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输及贮存。

本文件适用于近距离通信单兵装备，涵盖太赫兹通信模块与单兵光电装备、战术计算机、传感器、通信电台、导航定位设备、生命体征监测设备等终端的高速互联场景，支持200 m以内视距通信，适用于军事训练、边境巡逻、应急救援、特种作战、城市反恐、维和任务等近距协同任务场景。

本文件可作为装备研发、生产制造、质量管控、项目评审、定型鉴定及产业化应用的技术依据。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GJB 150.1A 军用装备实验室环境试验方法 第1部分：通用要求
- GJB 150.15A 军用装备实验室环境试验方法 第15部分：加速度试验
- GJB 150.18A 军用装备实验室环境试验方法 第18部分：冲击试验
- GJB 151B 军用设备和分系统 电磁发射和敏感度要求与测量
- GJB 367A 军用通信设备通用规范
- GJB 548B 微电子器件试验方法和程序
- GJB 1145A—2010 通信和指挥自动化军工产品定型试验规程
- GB/T 2423.7 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ec：粗率操作造成的冲击（主要用于设备型样品）
- GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GJB 7175 军用网络安全隔离交换产品通用要求
- GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
- GB/T 17626.3 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分：射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
- GB/T 17626.5 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验
- GB/T 28181 公共安全视频监控联网系统信息传输、交换、控制技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

太赫兹近距离通信 terahertz short-range communication

工作在0.1 THz~0.3 THz优先试验频段，利用太赫兹波超大带宽特性实现近距高速数据传输的通信方式，适用于200 m以内视距协同场景，兼具高保密性和抗干扰能力。

3.2

单兵装备高速互联 high-speed interconnection of individual soldier equipment

通过太赫兹通信模块实现单兵携带的光电装备、战术终端、传感器等设备间的高速数据交互，涵盖图像、视频、指令等多类型数据的低时延传输。

3.3

波束赋形 beamforming

通过调整天线阵列中各辐射单元的相位和幅度，使天线波束在空间指向特定方向的技术。

3.4

串行器/解串器 serializer/deserializer; SerDes

一种将并行数据转换为高速串行数据（发送端）以及将串行数据恢复为并行数据（接收端）的集成电路技术，用于解决高速数据传输中的时序、噪声和距离问题。

3.5

服务质量 quality of service; QoS

网络为特定业务流提供差异化服务保障的能力，包括带宽保证、时延控制、丢包率限制等。在单兵装备互联场景中，QoS机制用于保障战术指令、传感信息、语音通信等高优先级业务的低时延、高可靠传输。

3.6

封装天线 antenna in package; AiP

将天线与射频芯片集成在同一封装体内的技术，可实现天线的小型化、低成本和高性能。AiP技术是太赫兹通信模块小型化的关键技术路线。

3.7

混频器 mixer

实现太赫兹频段信号频率变换的非线性器件，用于发射链路的上变频和接收链路的下变频。混频器的核心参数包括变频损耗、噪声系数、隔离度等。

3.8

功率放大器 power amplifier; PA

将射频信号功率放大至所需发射功率水平的器件。在太赫兹频段，功率放大器面临增益低、效率低、散热难等技术挑战，是太赫兹通信系统的关键器件之一。

3.9

载波同步 carrier synchronization

接收端恢复发射载波频率和相位信息的过程，是相干解调的前提。太赫兹通信中的载波同步面临高相位噪声大、多普勒频移等难题。

3.10

信道估计 channel estimation

接收端估计信道频率响应或冲激响应的过程，是均衡、解调、译码等后续处理的基础。信道估计精度直接影响通信系统性能。

4 略缩语

下列缩略语适用于本文件。

ADC: 模数转换器 (Analog-to-Digital Converter)

BER: 误码率 (Bit Error Rate)

SerDes: 串行器/解串器 (Serializer/Deserializer)

HDMI: 高清多媒体接口 (High Definition Multimedia Interface)

5 总体要求

5.1 一般要求

- 5.1.1 高速互联技术应遵循安全可靠、高速低时延、小型轻量化、环境适配的原则，符合军用通信相关标准要求。
- 5.1.2 互联系统应实现太赫兹通信与单兵装备的深度集成，确保装备的实用性和稳定性。
- 5.1.3 设计与生产应满足军民两用需求，军用装备需通过军工质量体系认证，民用装备应符合公共安全领域相关技术规范。
- 5.1.4 关键性能指标的批次一致性波动范围不超过 $\pm 5\%$ ，确保装备的可量产性和可靠性。
- 5.1.5 互联系统应支持设备自动发现、身份认证、链路协商、参数匹配的标准化流程，无需人工配置即可实现快速互联。
- 5.1.6 互联系统应支持不同速率等级、不同功能配置设备的向下兼容，保障高低配设备的协同通信。
- 5.1.7 系统应具备良好的电磁兼容性，工作时不会对单兵携行的其他电子装备（光电观瞄、战术电台、导航定位设备等）产生干扰，同时具备足够的抗电磁干扰能力。
- 5.1.8 系统应具备完善的安全防护机制，支持身份认证、接入控制、全链路数据加密、防篡改、防重放、抗截获、抗干扰功能。
- 5.1.9 系统应采用模块化、可扩展的架构设计，支持功能升级和性能扩展，模块接口应标准化，便于后期维护和升级。
- 5.1.10 系统应支持工作、待机、休眠、深度休眠多级功耗模式，自适应切换功耗状态，延长单兵携行装备续航时间。

5.2 系统功能要求

系统功能要求应包括。

- a) 高速数据传输功能：支持点对点、点对多点的高速无线数据传输，满足高清视频、图像、传感数据、战术指令、语音等多业务传输需求。
- b) 自适应组网功能：支持单兵班组内的快速自组网，支持主从模式、对等模式组网，支持节点动态加入/退出、链路自动切换。
- c) 链路自适应功能：支持根据信道质量、通信距离、移动速度，自适应调整调制方式、编码速率、发射功率、波束指向，保障通信链路稳定性。
- d) 波束管理功能：支持波束快速扫描、对准、跟踪、校准，适配单兵移动场景下的波束动态调整，补偿路径损耗，降低信号泄漏。
- e) QoS 保障功能：支持战术业务优先级划分，对指令传输、语音通信、高清视频、传感数据等不同业务分配差异化的通信资源，保障高优先级业务的低时延、高可靠传输。
- f) 安全防护功能：支持身份认证、接入控制、全链路数据加密、防篡改、防重放、抗截获、抗干扰功能，符合军用无线网络安全要求。
- g) 设备管理功能：支持设备状态监测、参数配置、固件升级、故障诊断、日志记录与上报功能，可对接单兵综合管理系统。
- h) 互联互通功能：遵循统一的协议与接口规范，兼容不同厂商的太赫兹模块、不同类型的单兵战术装备，支持与单兵现有通信系统的对接适配。
- i) 低功耗管理功能：支持工作、待机、休眠、深度休眠多级功耗模式，自适应切换功耗状态，延长单兵携行装备续航时间。
- j) 故障自恢复功能：支持断链自动重连、故障自诊断、参数自适应恢复，单点故障不影响系统整体运行，提升复杂场景下的可靠性。

5.3 信息安全要求

- 5.3.1 系统应符合 GJB 7175 的要求，保障战术通信的保密性、完整性、可用性、不可否认性、抗毁性，防止信息窃听、篡改、伪造、重放、非法接入。
- 5.3.2 设备接入前必须完成身份合法性校验，拒绝非法节点接入网络，认证成功率 100%，非法接入拦截率 100%。

- 5.3.3 支持身份唯一标识，采用硬件级安全芯片存储密钥与身份证书，不可篡改、不可复制。
- 5.3.4 支持分级权限管理，对不同设备、不同用户分配对应的操作权限与通信权限，实现最小权限控制。
- 5.3.5 认证过程采用一次一密的会话密钥，避免认证信息被窃听、重放。
- 5.3.6 支持全链路数据加密，所有业务数据、控制信令均采用硬件加密。
- 5.3.7 支持会话密钥动态协商与定期更新，密钥更新周期可配置，最长不超过 24h。
- 5.3.8 支持防重放攻击机制，采用时间戳、随机数、序列号机制，拒绝重放报文，重放攻击拦截率 100%。

5.4 设备安全要求

- 5.4.1 设备固件采用加密存储与签名校验，固件升级包应经过数字签名验证，防止恶意固件篡改、注入，非法固件刷写拦截率 100%；
- 5.4.2 支持固件升级失败自动回滚机制，避免升级过程中设备变砖。
- 5.4.3 设备具备安全启动功能，启动过程中逐级校验固件完整性与合法性，被篡改的固件无法启动。
- 5.4.4 设备调试接口、维护接口具备权限控制与锁定机制，防止非授权访问与调试。
- 5.4.5 设备具备安全日志功能，完整记录身份认证、接入、配置修改、固件升级、故障等事件，日志不可篡改、不可删除，留存时间≥6个月。

5.5 安全与伦理要求

- 5.5.1 禁止利用本文件涉及的互联技术从事危害国家安全、破坏公共利益的活动，军用装备应通过军事安全风险评估。
- 5.5.2 通信数据应采用加密传输方式，符合 GJB 7175 的要求，确保数据传输的保密性和完整性，防止信息泄露。
- 5.5.3 装备研发与生产应遵循军工伦理要求，避免技术滥用，涉及军事敏感技术的部分应严格按照保密规定管理。

6 系统架构

互联系统采用四层端到端架构，分为终端设备层、太赫兹通信层、网络适配层、战术业务层，各层级通过标准化接口实现数据交互与功能协同，整体系统架构见表1。

表 1 系统架构

架构层级	核心组成	核心功能
战术业务层	单兵光电观瞄装备、战术计算机、穿戴式传感器、战术终端、语音通信设备	业务数据采集、战术应用实现、人机交互、数据展示与存储
网络适配层	接口适配单元、协议转换单元、业务QoS管理单元、设备管理单元	实现单兵装备与太赫兹通信层的接口适配、协议转换、业务优先级调度、设备状态管控
通信层	基带处理单元、太赫兹射频前端、天线阵列、波束管理单元、协议栈处理单元	实现太赫兹信号的发射/接收、调制解调、编解码、波束赋形、链路管理、组网控制、安全加密
终端设备层	单兵携行电源、机械结构、防护壳体、配套外设	为系统提供供电、结构支撑、环境防护、人机交互硬件支撑

7 设计要求

7.1 总体设计要求

7.1.1 系统架构：应采用模块化、可扩展的架构。太赫兹通信模块应与单兵装备的主控单元在物理和逻辑上解耦，通过标准互联接口进行连接，模块应支持后期向组网方向拓展。

系统设计应满足以下要求。

- a) 功能模块划分：
 - 1) 射频前端模块：实现太赫兹信号的发射和接收；
 - 2) 基带处理模块：实现数字信号处理功能；

- 3) 天线模块：实现电磁波的空间辐射和接收；
 - 4) 接口模块：实现与外部设备的物理连接；
 - 5) 电源模块：实现电源管理和供电功能；
 - 6) 控制模块：实现系统控制和协议处理。
- b) 接口标准化：
- 1) 射频接口：采用标准波导接口或同轴接口；
 - 2) 数据接口：采用标准 SerDes、LVDS、以太网、HDMI 接口等；
 - 3) 控制接口：采用标准 SPI、I2C 或 UART 接口；
 - 4) 电源接口：采用标准电源连接器。
- c) 互换性：
- 1) 各模块应独立设计，便于单独测试和更换；
 - 2) 模块间接口应兼容不同厂商的产品；
 - 3) 模块升级不应影响其他模块的正常工作。
- 7.1.2 散热设计：应采用被动散热为主的设计，利用高导热外壳、热界面材料及合理的自然对流通道设计将热量导出。

散热设计应满足以下要求。

- a) 热源分析：
- 1) 功率放大器：主要热源；
 - 2) 基带处理芯片：次要热源；
 - 3) 电源模块：辅助热源。
- b) 散热方案：
- 1) 导热路径：芯片→导热垫→金属外壳→环境空气；
 - 2) 导热材料：采用高导热系数材料（铜、铝、石墨烯等）；
 - 3) 散热结构：采用散热鳍片或散热孔增加散热面积；
 - 4) 热界面材料：采用导热硅脂或导热垫片。
- c) 热设计计算：
- 1) 结温计算： $T_j = T_a + P \times R_{thja}$
式中：
 T_j ——芯片结温，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；
 T_a ——环境温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；
 P ——芯片功耗，单位为 W ；
 R_{thja} ——结到环境的热阻，单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。
 - 2) 热阻计算： $R_{thja} = R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa}$
式中：
 R_{thjc} ——结到壳的热阻，单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；
 R_{thcs} ——壳到散热器的接触热阻，单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；
 R_{thsa} ——散热器到环境的热阻，单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。
- d) 温度控制：芯片温度超过阈值时自动降功率或关机。

7.1.3 防护设计：应具备一定的抗冲击和抗振动能力，具体指标应符合 GJB 150.1A 中相关试验条件的要求，推荐模块外壳设计时考虑一定的防尘、短暂浸水要求。

防护设计应满足以下要求。

- a) 机械防护：
- 1) 外壳材料：采用高强度铝合金或复合材料；
 - 2) 结构设计：采用加强筋和缓冲结构；
 - 3) 连接器加固：采用螺纹锁紧或卡扣锁紧。
- b) 环境防护：
- 1) 适配系统进行防尘防水设计；
 - 2) 防盐雾：满足 GJB 150.11A 盐雾试验要求；
 - 3) 防霉菌：满足 GJB 150.10A 霉菌试验要求。

- c) 电磁防护：
 - 1) 屏蔽设计：外壳采用导电材料并良好接地；
 - 2) 缝隙处理：接缝处采用导电衬垫或指形簧片；
 - 3) 孔洞处理：通风孔采用金属丝网或波导截止结构。

7.2 天线设计要求

7.2.1 应采用集成化天线设计，如平面微带天线或封装天线（AiP）。推荐采用波束赋形技术，以补偿太赫兹频段的路径损耗并增强抗干扰能力。天线增益、波束宽度、旁瓣电平等参数应在产品规范中明确。

天线设计应满足以下要求。

- a) 天线类型选择：
 - 1) 微带天线：适用于低频段，成本低、易集成；
 - 2) 缝隙天线：适用于中频段，带宽较宽；
 - 3) 透镜天线：适用于高频段，增益高、波束窄；
 - 4) AiP 天线：适用于全频段，集成度高、一致性好。
- b) 天线阵列设计：
 - 1) 阵列规模：根据增益要求确定；
 - 2) 单元间距：应满足 $d \leq \lambda/2$ ，避免栅瓣；
 - 3) 馈电网络：采用微带线或共面波导馈电；
 - 4) 波束扫描：支持数字波束赋形或模拟波束赋形。
- c) 天线参数要求：
 - 1) 工作频段：覆盖 100 GHz~300 GHz；
 - 2) 极化方式：线极化或圆极化。
- d) 波束赋形设计：
 - 1) 赋形算法：支持基于 FFT 的快速波束赋形算法；
 - 2) 权值计算：采用最小均方误差（MMSE）或最大信噪比（Max-SNR）准则；
 - 3) 赋形增益：相对于单天线增益提升不小于 $10 \times \log_{10}(N)$ ，N 为阵列单元数。

7.3 射频前端设计要求

7.3.1 发射链路设计：发射链路实现基带信号到太赫兹射频信号的变换，主要包括 DAC、上变频器、倍频链、功率放大器等模块。

7.3.2 接收链路设计：接收链路实现太赫兹射频信号到基带信号的变换，主要包括 LNA、下变频器、滤波器、ADC 等模块。

7.3.3 本振源设计：本振源为发射链路和接收链路提供相干的本振信号，主要包括参考源、PLL、VCO、倍频链等模块。

7.4 基带处理设计要求

7.4.1 调制解调设计：基带处理实现数字调制解调功能，支持多种调制方式，包括但不限于。

- a) BPSK：频谱效率 1 bit/s/Hz，抗干扰能力强，适用于低信噪比环境。
- b) QPSK：频谱效率 2 bit/s/Hz，兼顾频谱效率和抗干扰能力。
- c) 16QAM：频谱效率 4 bit/s/Hz，适用于中等信噪比环境。
- d) 64QAM：频谱效率 6 bit/s/Hz，适用于高信噪比环境。

7.4.2 编解码设计：基带处理实现信道编解码功能，提高链路可靠性。

7.4.3 同步设计：同步是通信系统的关键功能，包括载波同步、符号同步、帧同步。

7.4.4 信道估计与均衡：信道估计和均衡用于补偿信道衰落和失真。

7.5 软件与算法要求

7.5.1 链路管理算法：链路管理算法实现链路的建立、维护和释放。

- a) 链路建立：
 - 1) 设备发现：采用周期性广播或被动监听方式发现邻近设备，发现时间不大于 5 s；
 - 2) 身份认证：采用挑战-响应机制，基于数字证书的双向认证，认证时间不大于 1 s；

- 3) 链路协商：协商工作频率、调制方式、编码速率、发射功率等参数。
 - b) 链路维护：
 - 1) 链路监测：周期性发送心跳包监测链路状态，心跳周期 1 s~10 s 可配置；
 - 2) 链路自适应：根据信道质量动态调整传输参数；
 - 3) 波束跟踪：采用卡尔曼滤波或粒子滤波算法跟踪移动目标。
 - c) 链路释放：
 - 1) 正常释放：发送链路释放请求，等待确认后释放链路；
 - 2) 异常释放：检测到链路故障时自动释放链路。
- 7.5.2 组网算法：组网算法实现多节点之间的网络组建和管理。
- a) 自组网算法：
 - 1) 邻居发现：每个节点周期性发送信标帧，发现邻近节点，发现时间不大于 10 s；
 - 2) 拓扑形成：根据应用需求形成星型、网状等拓扑结构，拓扑形成时间不大于 5 s；
 - 3) 路由建立：按需确定路由协议，路由建立时间不大于 3 s。
 - b) 网络维护：
 - 1) 节点加入：新节点加入网络，网络重构时间不大于 3 s；
 - 2) 节点退出：节点正常退出或异常离线，网络重构时间不大于 3 s；
 - 3) 链路切换：主链路故障时切换至备用链路。
 - c) 资源调度：
 - 1) 时隙分配：采用 TDMA 机制，动态分配时隙资源；
 - 2) 功率控制：采用开环或闭环功率控制，维持链路质量。
- 7.5.3 波束管理算法：波束管理算法实现波束的扫描、对准、跟踪和校准。
- a) 波束扫描算法：
 - 1) 全空域扫描：遍历所有波束方向。
 - 2) 分层扫描：先进行粗扫描确定大致方向，再进行精扫描精确定位。
 - b) 波束对准算法：
 - 1) 信噪比最大化：选择信噪比最大的波束方向作为对准方向。
 - 2) 梯度下降：根据信噪比梯度调整波束方向。
 - c) 波束跟踪算法：
 - 1) 卡尔曼滤波：预测目标位置，更新波束方向，跟踪精度高，计算复杂度中等。
 - 2) 粒子滤波：适用于非线性非高斯环境，跟踪精度高，计算复杂度高。
 - 3) 扩展卡尔曼滤波（EKF）：适用于弱非线性环境，计算复杂度低，跟踪精度中等。
 - d) 波束校准算法：
 - 1) 内校准：利用内部参考信号校准各通道幅度和相位。
 - 2) 外校准：利用外部参考源校准阵列方向图。
- 7.5.4 安全算法：安全算法实现身份认证、数据加密、完整性保护等功能。
- a) 身份认证算法：
 - 1) 数字证书：采用数字证书并约定证书长度。
 - 2) 挑战—响应：认证服务器发送随机数挑战，客户端用私钥签名响应，服务器用公钥验证签名。
 - 3) 双向认证：客户端和服务端互相认证，确保双方身份合法。
 - b) 数据加密算法：
 - 1) 对称加密：采用 AES-256 或 SM4 算法，约定合适的密钥长度，加密速度快，适用于大数据量加密。
 - 2) 非对称加密：采用 RSA-2048 或 SM2 算法，约定合适的密钥长度，加密速度慢，适用于密钥交换和数字签名。
 - 3) 混合加密：用非对称加密传输会话密钥，用对称加密传输业务数据，兼顾安全性和效率。
 - c) 完整性保护算法：
 - 1) HMAC：采用 HMAC-SHA256 算法，生成 256 bit 消息认证码，验证数据完整性。
 - 2) 数字签名：采用 RSA-2048 或 SM2 算法对数据摘要签名，验证数据来源和完整性。

d) 密钥管理算法:

- 1) 密钥生成: 采用真随机数发生器生成密钥。
- 2) 密钥分发: 采用 Diffie-Hellman 或 ECDH 算法协商会话密钥, 防止密钥泄露。
- 3) 密钥更新: 会话密钥定期更新, 更新周期可配置, 最长不超过 24 h。
- 4) 密钥销毁: 会话结束后安全销毁密钥, 防止密钥泄露。

8 材料与模块要求

8.1 材料要求

8.1.1 太赫兹模块外壳材料: 非天线辐射面应采用轻质、高强度、高导热、具有电磁屏蔽的材料(如铝合金、不锈钢等), 表面应进行导电氧化或镀层处理, 确保良好的电连续性、散热性和三防(防潮、防盐雾、防霉菌)性能; 天线辐射面应采用不具有电磁屏蔽特性的非金属材料, 具体可根据订购方与承制方相关要求确定。

8.1.2 天线阵列材料: 应采用在目标工作频段内介电常数稳定、损耗角正切低的材料, 推荐基于集成电路实际特点形成 AIP 集成天线, 具体材料根据封装工艺确定。

8.1.3 电路板材料: 用于太赫兹有源芯片(如倍频器、放大器、混频器)的承载基板, 应具有高热导率与与芯片匹配的热膨胀系数。

8.1.4 连接材料: 芯片与基板间的互连材料应保证高频信号完整性。推荐采用金丝键合, 键合丝直径应满足电流容量要求, 键合点拉力应符合 GJB 548B 的要求, 芯片贴装应采用高导热特性的材料。

8.2 太赫兹收发模块要求

工作频段: 具体工作频段应在产品规范中明确, 并符合国家无线电管理相关规定, 推荐使用以下中心频点。

a) 优先试验频段:

- 1) 100 GHz \pm 5 GHz;
- 2) 120 GHz \pm 6 GHz;
- 3) 150 GHz \pm 7.5 GHz。

b) 扩展频段:

- 1) 220 GHz \pm 11 GHz;
- 2) 300 GHz \pm 15 GHz。

c) 频段选择原则:

- 1) 根据通信距离和带宽需求选择合适频段;
- 2) 低频段(100 GHz~150 GHz)适用于远距离通信;
- 3) 高频段(220 GHz~300 GHz)适用于大带宽通信;
- 4) 根据通信距离选择是否需要考虑大气吸收窗口以进行规避。

8.2.1 输出功率: 输出功率应满足实际应用场景下通信距离, 并留有足够的余量, 可在产品规范中明确。

8.2.2 尺寸与重量: 由订购方和承制方根据具体使用场景确定, 推荐单收发模块的外形尺寸应不大于 50mm \times 50mm \times 30mm、重量不大于 200g。

8.2.3 功耗: 由订购方和承制方根据具体使用场景确定, 推荐单收发模块在典型工作模式下, 平均功耗应不大于 3W、待机功耗应不大于 1W。

8.2.4 可靠性: 应遵循 GJB 367A 中关于地面通信设备的相关要求。

8.3 互联接口要求

8.3.1 互联接口应提供高速数据传输通道, 如 SerDes、HDMI, 或订购方和承制方自定义确定, 并在产品规范中明确。

a) SerDes 接口:

- 1) 数据速率: 3 Gbps、6 Gbps、15 Gbps;
- 2) 编码方式: 8B/10B 或 64B/66B;

- 3) 电气特性: CEI-6G-SR、CEI-11G-SR;
 - 4) 连接器: 高速板对板连接器;
 - 5) 线缆长度: 不大于 1 m (3 Gbps)、不大于 0.5 m (15 Gbps)。
 - b) HDMI 接口:
 - 1) 版本: HDMI 1.4 或 HDMI 2.0;
 - 2) 数据速率: 3.4 Gbps/lane (HDMI 1.4)、6 Gbps/lane (HDMI 2.0);
 - 3) 视频格式: 1080P@60fps、4K@30fps;
 - 4) 连接器: HDMI Type A 或 Type D;
 - 5) 线缆长度: 不大于 3 m。
 - c) USB 接口:
 - 1) 版本: USB 3.0;
 - 2) 数据速率: 5 Gbps (USB 3.0)、10 Gbps (USB 3.1);
 - 3) 供电: 5 V/900 mA;
 - 4) 连接器: USB Type A、Type C 或 Micro USB;
 - 5) 线缆长度: 不大于 3 m。
 - d) 以太网接口:
 - 1) 类型: 1000BASE-T 或 10GBASE-T;
 - 2) 数据速率: 1 Gbps 或 10 Gbps;
 - 3) 连接器: RJ45 或 SFP+。
- 8.3.2 接口速率推荐 3Gbps、6Gbps、15Gbps 等常见速率, 以满足不同应用场景下的数据吞吐需求。
- a) 速率选择:
 - 1) 3 Gbps: 适用于 1080P 视频传输;
 - 2) 6 Gbps: 适用于 4K@30fps 视频传输;
 - 3) 15 Gbps: 适用于 4K@60fps 或多路视频传输。
 - b) 速率自适应:
 - 1) 支持速率协商, 自动选择最高可用速率;
 - 2) 速率切换时间不大于 100 ms;
 - 3) 向下兼容低速率设备。
 - c) 误码率要求:
 - 1) 接口误码率: 不大于 10^{-12} ;
 - 2) 抖动: 不大于 0.15 UI (单位间隔)。
- 8.3.3 接口协议应与其他单兵装备具有良好的兼容性, 接口的电气特性应符合相应标准规范。
- a) 协议兼容性:
 - 1) 支持标准协议: SerDes、HDMI、USB、以太网等;
 - 2) 支持自定义协议: 根据应用需求定义;
 - 3) 协议版本兼容: 向前兼容和向后兼容。
 - b) 电气兼容性:
 - 1) 电平标准: 符合相应接口标准;
 - 2) 阻抗匹配: 50 Ω /100 Ω 或协商确定;
 - 3) 信号完整性: 满足眼图模板要求。
 - c) 机械兼容性:
 - 1) 连接器类型: 标准连接器;
 - 2) 安装尺寸: 符合标准规范;
 - 3) 插拔寿命: 不小于 5000 次。

9 性能要求

9.1 电气性能

电气性能应符合表2的要求。

表 2 电气性能

项目	单位	推荐参数	备注
中心频率	GHz	100/120/150/300	
射频输出功率	dBm	/	根据使用场景确定
供电电压	V	1.8/3.5/5/12	
平均功耗	W	≤3	
SerDes基带差分输入	mV	≥800mV	
SerDes基带差分输出	mV	≥500mV	

9.2 通信性能

通信性能应符合表3的要求。

表 3 通信性能

参数	单位	推荐参数	备注
通信速率	Gbps	3/6/15	
端到端传输时延	ms	≤5	
误码率	/	≤1×10 ⁻⁵	
通信距离	m	200m以内	根据使用场景确定

9.3 环境适应性

应符合GJB 150.1A和GJB 367A的规定。

9.4 力学性能

力学性能应符合表4的要求。

表 4 力学性能

试验项目	试验条件	合格判据
正弦振动试验	频率10Hz~150Hz，加速度1g，三轴各2h，扫频速率1oct/min	试验中设备无共振、无结构损坏，通电工作正常；试验后紧固件无松动
随机振动试验	频率20Hz~2000Hz，总均方根加速度10g，三轴各1h	试验中设备工作正常，无通信中断；试验后结构无损坏，元器件无脱落，性能无衰减
冲击试验	半正弦波，峰值15g，脉冲宽度11ms，三轴正反向各3次	试验后设备结构无损坏、紧固件无松动，元器件无脱落，通电工作正常
跌落试验	跌落高度1.2m，水泥地面，自由跌落，6个面各1次	试验后设备外壳无开裂、结构无变形，内部元器件无脱落，通电工作正常，性能无衰减
加速度试验	恒加速度20g，三轴正反向各1min	试验后设备结构无损坏、元器件无位移脱落，通电工作正常

9.5 可靠性

9.5.1 平均无故障工作时间（MTBF）：≥10000 h。

9.5.2 平均修复时间（MTTR）：≤30min。

9.5.3 接口插拔寿命：≥5000次，性能无衰减。

9.5.4 全温区范围内，设备无死机、无重启、无性能断崖式衰减。

9.6 电磁兼容性

电磁发射与电磁敏感度应符合GJB 151B的要求，同时满足以下要求：

- 工作时产生的电磁发射，不会对单兵携行的其他电子装备（光电观瞄、战术电台、导航定位设备等）产生干扰，影响其正常工作；
- 应具备足够的抗电磁干扰能力，在战场复杂电磁环境、单兵其他装备的电磁辐射环境下，能正常工作，通信性能无明显劣化；

- c) 太赫兹射频辐射应符合国家无线电管理与电磁辐射安全相关规定，保障单兵人身安全。

10 试验方法

10.1 电气性能试验

10.1.1 中心频率测试。

- a) 测试目的：验证太赫兹通信模块的中心频率是否符合要求。
- b) 测试设备：
- 1) 频谱分析仪：频率范围覆盖被测频段，频率精度规范要求；
 - 2) 标准天线：已知增益的标准喇叭天线；
 - 3) 衰减器：大功率衰减器，衰减量根据发射功率选择；
 - 4) 测试电缆：低损耗太赫兹测试电缆。
- c) 测试步骤：
- 1) 连接测试系统；
 - 2) 设置被测设备发射连续波信号；
 - 3) 设置频谱分析仪中心频率为标称频率；
 - 4) 读取频谱峰值对应的频率，即为实测中心频率；
 - 5) 记录测试结果。
- d) 合格判据：实测中心频率符合约定要求。

10.1.2 射频输出功率测试

- a) 测试目的：验证太赫兹通信模块的射频输出功率是否符合要求。
- b) 测试设备：
- 1) 功率计：频率范围覆盖被测频段；
 - 2) 标准天线：已知增益的标准喇叭天线；
 - 3) 衰减器：大功率衰减器，衰减量根据发射功率选择；
 - 4) 测试电缆：低损耗太赫兹测试电缆。
- c) 测试步骤：
- 1) 连接测试系统；
 - 2) 设置被测设备发射连续波信号；
 - 3) 设置功率计频率为被测频率；
 - 4) 读取功率计显示的功率值；
 - 5) 根据衰减器衰减量和天线增益计算实际发射功率：

$$P_t = P_m + L_a - G_a$$

式中：

P_t ——发射功率，单位为dBm；

P_m ——功率计读数，单位为dBm；

L_a ——衰减器衰减量，单位为dB；

G_a ——天线增益，单位为dBi。

- 6) 记录测试结果。

- d) 合格判据：实测发射功率不低于标称值。

10.1.3 接收灵敏度测试

- a) 测试目的：验证太赫兹通信模块的接收灵敏度是否符合要求。
- b) 测试设备：
- 1) 太赫兹信号源：频率范围覆盖被测频段；
 - 2) 标准天线：已知增益的标准喇叭天线；
 - 3) 衰减器：精密可调衰减器；
 - 4) 误码率测试仪：支持太赫兹通信接口；
 - 5) 测试电缆：低损耗太赫兹测试电缆。
- c) 测试步骤：

- 1) 连接测试系统;
- 2) 设置信号源输出调制信号;
- 3) 设置信号源输出功率;
- 4) 被测设备接收信号, 误码率测试仪测量误码率;
- 5) 逐步降低信号源输出功率, 直至误码率达到 1×10^{-5} ;
- 6) 记录此时的信号源输出功率;
- 7) 根据衰减器衰减量和天线增益计算实际接收功率:

$$P_r = P_s - L_a + G_a$$

式中:

- P_r ——接收功率, 单位为dBm;
 P_s ——信号源输出功率, 单位为dBm;
 L_a ——衰减器衰减量, 单位为dB;
 G_a ——天线增益, 单位为dBi。

- 8) 记录测试结果。

- d) 合格判据: 接收灵敏度不高于标称值。

10.1.4 其他: 按照 GJB 1145A—2010 中 5.2.1.4 规定进行试验。

10.2 通信性能试验

10.3 通信性能试验

10.3.1 通信速率测试

- a) 测试目的: 验证太赫兹通信模块的通信速率是否符合要求。
- b) 测试设备:
 - 1) 数据流量发生器: 支持太赫兹通信接口, 可产生 3 Gbps、6 Gbps、15 Gbps 或其他约定的速率的数据流;
 - 2) 数据流量分析仪: 支持太赫兹通信接口, 可测量接收数据速率;
 - 3) 标准天线: 已知增益的标准喇叭天线;
 - 4) 测试电缆: 低损耗太赫兹测试电缆;
 - 5) 衰减器: 可调衰减器, 用于模拟不同通信距离。
- c) 测试步骤:
 - 1) 连接测试系统;
 - 2) 设置数据流量发生器输出 3 Gbps 数据流;
 - 3) 1 号被测设备发射, 2 号被测设备接收;
 - 4) 数据流量分析仪测量接收数据速率;
 - 5) 逐步增加数据流量发生器输出速率, 直至 6 Gbps、15 Gbps 或其他约定的速率;
 - 6) 在每个速率点测量接收数据速率和误码率;
 - 7) 记录测试结果。
- d) 合格判据:
 - 1) 支持 3 Gbps、6 Gbps、15 Gbps 等多种速率;
 - 2) 实测速率不低于标称速率的 95%;
 - 3) 误码率不大于 1×10^{-5} 。

10.3.2 端到端传输时延测试。

- a) 测试目的: 验证太赫兹通信模块的端到端传输时延是否符合要求。
- b) 测试设备:
 - 1) 时延测试仪: 时间分辨率不大于 $1 \mu s$, 精度 $\pm 0.1 \mu s$;
 - 2) 标准天线: 已知增益的标准喇叭天线;
 - 3) 测试电缆: 低损耗太赫兹测试电缆。
- c) 测试步骤:
 - 1) 连接测试系统;
 - 2) 时延测试仪发送测试帧到被测设备 A;

- 3) 被测设备 A 通过太赫兹链路发送给被测设备 B;
- 4) 被测设备 B 回送测试帧到时延测试仪;
- 5) 时延测试仪测量往返时延;
- 6) 计算单向时延:

$$T_{\text{one}} = T_{\text{rt}} / 2$$

式中:

T_{one} ——单向时延;

T_{rt} ——往返时延。

- 7) 重复测量不少于 10 次, 取最小值、平均值和最大值;
- 8) 记录测试结果。

- d) 合格判据: 平均端到端传输时延不大于 5ms 或其他约定的传输时延。

10.3.3 误码率测试

- a) 测试目的:

验证太赫兹通信模块的误码率性能是否符合要求。

- b) 测试设备:

- 1) 误码率测试仪: 支持太赫兹通信接口;
- 2) 标准天线: 已知增益的标准喇叭天线;
- 3) 衰减器: 可调衰减器, 用于调整接收信号强度;
- 4) 测试电缆: 低损耗太赫兹测试电缆。

- c) 测试步骤:

- 1) 连接测试系统;
- 2) 设置误码率测试仪产生发送数据序列;
- 3) 设置发射功率为标称值;
- 4) 设置衰减器衰减量, 使接收功率为-60 dBm;
- 5) 误码率测试仪测量误码率;
- 6) 连续测量不少于 10 分钟或误码数不少于 100 个;
- 7) 计算误码率:

$$\text{BER} = N_e / N_t$$

式中:

BER——误码率;

N_e ——误码数;

N_t ——总码数。

- 8) 记录测试结果。

- d) 合格判据: 误码率不大于 1×10^{-5} 或其他约定值。

10.3.4 通信距离测试

- a) 测试目的: 验证太赫兹通信模块的最大通信距离是否符合要求。

- b) 测试设备:

- 1) 误码率测试仪: 支持太赫兹通信接口;
- 2) 标准天线: 已知增益的标准喇叭天线;
- 3) 测距仪: 精度 ± 0.1 m;
- 4) 三脚架: 用于固定被测设备和天线。

- c) 测试步骤:

- 1) 在开阔场地 (如微波暗室或室外空旷场地) 布置测试系统;
- 2) 被测设备 A 和 B 分别安装在三脚架上, 天线高度 1.5 m;
- 3) 初始距离设置为 50 m;
- 4) 误码率测试仪测量误码率;
- 5) 逐步增加距离, 每次增加 10 m;
- 6) 在每个距离点测量误码率;
- 7) 当误码率超过 1×10^{-5} 时, 记录上一距离为最大通信距离;

8) 记录测试结果。

d) 合格判据：最大通信距离不小于 200 m 或其他约定值（视距， $BER \leq 1 \times 10^{-5}$ ）。

10.3.5 其他：按照 GJB 1145A—2010 中 5.2.1.8 规定进行试验。

10.4 环境适应性试验

按照 GJB 150.1A 和 GJB 367A 规定进行试验。

10.5 力学性能

10.5.1 正弦振动试验

按照 GB/T 2423.10 的规定进行试验。

10.5.2 随机振动试验

按照 GJB 360B 的规定进行试验。

10.5.3 冲击试验

按照 GJB 150.18A 的规定进行试验。

10.5.4 跌落试验

按照 GB/T 2423.7 的规定进行试验。

10.5.5 加速度试验

按照 GJB 150.15A 的规定进行试验。

10.6 电磁兼容性

10.6.1 传导发射测试：按照 GJB 151B—2013 中 CE102 的规定进行试验。

10.6.2 辐射发射测试：按照 GJB 151B—2013 中 RE102 的规定进行试验。

10.6.3 静电放电抗扰度测试：按照 GB/T 17626.2 规定进行试验。

10.6.4 电快速瞬变脉冲群抗扰度测试：按照 GB/T 17626.4 规定进行试验。

10.6.5 浪涌抗扰度测试：按照 GB/T 17626.5 规定进行试验。

10.6.6 射频电磁场辐射抗扰度测试：按照 GB/T 17626.3 规定进行试验。

11 检验规则

11.1 检验分类

产品检验分为出厂检验、型式检验。

11.2 出厂检验

11.2.1 每台产品出厂前必须进行 100% 全项出厂检验，检验合格并附产品合格证、出厂检验报告后方可出厂，不合格产品严禁出厂，检验项目包括本文件第 9 章的全部要求。

11.2.2 出厂检验项目全部合格时，判定该产品出厂检验合格；若有一项不合格，应返修后重新检验，直至合格

11.3 型式检验

11.3.1 出现下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品试制定型鉴定时；
- b) 产品设计、核心元器件、生产工艺发生重大变更，可能影响产品性能时；
- c) 正常量产时，每 1 年进行一次型式检验；
- d) 产品停产 1 年以上，恢复生产时；
- e) 出厂检验结果与上次型式检验结果有重大差异时；
- f) 国家市场监管部门、行业主管部门提出型式检验要求时。

11.3.2 型式检验的样品应从经出厂检验合格的批产品中抽取。

12 标志、包装、运输和贮存

12.1 标志

12.1.1 产品上应有清晰、耐久的产品标志，包括。

- a) 产品型号和名称。
- b) 制造厂商名称或商标。
- c) 产品序列号。
- d) 生产日期或批次号；。
- e) 电源参数（电压、电流、功耗）。
- f) 射频参数（频率范围、发射功率）。
- g) 认证标志（如 CCC、CE 等，如适用）。
- h) 防护等级标志。

12.1.2 标志应位于产品明显位置，如外壳侧面或底部，便于查看。

12.1.3 标志可采用以下形式。

- a) 激光打标：永久性标记，不易磨损。
- b) 丝网印刷：清晰美观，耐磨性较好。
- c) 铭牌：金属或塑料铭牌，铆接或粘贴。
- d) 标签：不干胶标签，适用于临时标识。

12.1.4 包装箱上应有清晰的包装标志，包括。

- a) 产品型号和名称。
- b) 制造厂商名称和地址。
- c) 数量。
- d) 毛重和净重。
- e) 外形尺寸。
- f) 收发货标志。
- g) 包装储运图示标志（按照 GB/T 191），包括：
 - 1) 向上标志；
 - 2) 怕雨标志；
 - 3) 怕晒标志；
 - 4) 小心轻放标志；
 - 5) 堆码极限标志。
- h) 特殊标志：
 - 1) 防静电标志；
 - 2) 防潮标志；
 - 3) 易碎标志。

12.2 包装

12.2.1 内包装应满足以下要求。

- a) 采用防静电袋或防静电泡棉。
- b) 缓冲：
 - 1) 采用 EPE 泡棉、EPS 泡沫或气柱袋；
 - 2) 缓冲材料厚度不小于 20 mm；
 - 3) 缓冲材料应完全包裹产品。
- c) 固定：
 - 1) 产品在包装内应固定牢靠，无晃动；
 - 2) 使用绑带、卡扣或胶带固定。
- d) 标识：

- 1) 内包装内应放置产品合格证;
- 2) 内包装上应贴有产品标签。

12.2.2 外包装应满足以下要求。

- a) 材质:
 - 1) 瓦楞纸箱: 五层或七层瓦楞纸板;
 - 2) 木箱: 胶合板或实木, 适用于重型产品或长途运输;
 - 3) 塑料箱: 高强度工程塑料, 适用于重复使用。
- b) 结构:
 - 1) 箱体结构牢固, 接缝严密;
 - 2) 箱盖与箱体配合紧密, 开启方便;
 - 3) 箱内应有隔板或格挡, 防止产品相互碰撞。
- c) 防护:
 - 1) 包装箱应具有一定的防潮、防水能力;
 - 2) 包装箱应具有一定的抗压、抗冲击能力;
 - 3) 包装箱应具有一定的防尘能力。
- d) 标识:
 - 1) 包装箱外表面应印刷或粘贴包装标志;
 - 2) 包装标志应清晰、耐久。

12.2.3 包装箱内应附带以下随机文件。

- a) 产品合格证。
- b) 产品使用说明书。
- c) 产品保修卡。
- d) 装箱清单。
- e) 其他技术文件(如适用)。

12.2.4 包装完成后应进行包装检验, 包括。

- a) 外观检查: 包装完整, 无破损。
- b) 标识检查: 标志清晰、完整。
- c) 文件检查: 随机文件齐全。
- d) 跌落试验: 按照 GB/T 4857.5 进行跌落试验, 包装应能保护产品不受损坏。

12.3 运输

12.3.1 产品可采用以下运输方式。

- a) 公路运输:
 - 1) 普通货运车辆;
 - 2) 厢式货车(推荐, 防尘防雨);
 - 3) 集装箱运输(长途运输)。
- b) 铁路运输:
 - 1) 普通货运列车;
 - 2) 集装箱专列。
- c) 航空运输:
 - 1) 符合航空运输包装要求;
 - 2) 符合危险品运输规定(如适用)。
- d) 水路运输:
 - 1) 符合水路运输包装要求;
 - 2) 做好防潮、防水措施。

12.3.2 运输过程中应满足以下要求:

- a) 防雨防潮:
 - 1) 运输工具应具备防雨措施;
 - 2) 避免在雨天装卸;

- 3) 避免长时间露天堆放。
 - b) 防晒：
 - 1) 避免长时间阳光直射；
 - 2) 夏季运输应采取遮阳措施。
 - c) 防震：
 - 1) 轻装轻卸，避免野蛮装卸；
 - 2) 堆码稳固，防止倒塌；
 - 3) 避免与尖锐物品混装。
 - d) 堆放要求：
 - 1) 堆放高度不超过包装箱上标注的堆码极限；
 - 2) 堆放稳固，底层包装箱不受过度挤压；
 - 3) 避免倾斜堆放。
- 12.3.3 运输包装上应有清晰的运输标识，便于识别和操作。

12.4 贮存

12.4.1 产品贮存环境应满足以下要求。

- a) 温度：
 - 1) 贮存温度：0℃~+35℃；
 - 2) 温度变化率：不大于 10℃/h。
- b) 相对湿度应不大于 70%。
- c) 气压：
 - 1) 气压范围：70 kPa~106 kPa；
 - 2) 适用于海拔高度不大于 3000 m 的地区。
- d) 其他：
 - 1) 避免阳光直射；
 - 2) 避免雨淋、水浸；
 - 3) 避免腐蚀性气体；
 - 4) 避免强磁场；
 - 5) 避免剧烈振动。

12.4.2 产品贮存方式应满足以下要求。

- a) 原包装贮存：
 - 1) 产品应保持原包装状态贮存；
 - 2) 包装箱应完好无损。
- b) 堆放要求：
 - 1) 堆放于干燥、通风的仓库内；
 - 2) 堆放高度不超过包装箱上标注的堆码极限；
 - 3) 离地面高度不小于 10 cm；
 - 4) 离墙壁距离不小于 30 cm；
 - 5) 堆放稳固，防止倒塌。
- c) 分类存放：
 - 1) 不同型号、不同批次的产品应分类存放；
 - 2) 合格品与不合格品应分开存放；
 - 3) 待检品与已检品应分开存放。
- d) 标识管理：
 - 1) 贮存区域应有明显标识；
 - 2) 产品应有清晰的标识，便于识别；
 - 3) 建立库存台账，记录产品信息。

12.4.3 产品贮存期限应满足以下要求：

- a) 定期检验：

- b) 贮存期间应定期检查产品状态;
- c) 检查周期: 每 6 个月检查一次;
- d) 检查内容包括通电、包装完整性、外观状态、标识清晰度。

12.4.4 对于有特殊要求的元器件, 应满足相应的贮存要求。

- a) 静电敏感器件:
 - 1) 贮存于防静电环境中;
 - 2) 使用防静电包装;
 - 3) 操作人员应佩戴防静电手环。
 - b) 锂电池:
 - 1) 贮存于阴凉干燥处;
 - 2) 荷电状态: 30%~50%;
 - 3) 避免高温贮存。
 - c) 光学器件:
 - 1) 贮存于清洁环境中;
 - 2) 避免灰尘污染;
 - 3) 避免阳光直射。
-