QTT台址自动化电波环境监测系统

刘奇^{1,2*}, 王玥¹, 刘晔¹, 刘烽¹, 陈卯蒸¹, 王娜¹, 曹亮¹, 闫浩¹

1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: liuqi@xao.ac.cn

收稿日期: 2019-01-13; 接受日期: 2019-01-28; 网络出版日期: 2019-06-06

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)、国家自然科学基金(编号: 11473061, 11103056)、中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费和中国科学院天文大科学研究中心前瞻课题资助

摘要 拟建设的新疆奇台110 m全可动射电望远镜(Qi Tai Radio Telescope, QTT)具有极高的系统灵敏度, 良好的无线电环境是QTT科学产出的重要保证. 为确保QTT建设阶段台址各类电磁干扰的有效监测, 开发了自动化、高可靠性电波环境监测系统, 该系统开发依据需求分析, 采用高紧凑性微波器件集成方案; 系统性能实测结果表明6 GHz以下频段系统增益大于40 dB, 噪声系数小于2 dB; 7 GHz以下频段测量不确定度小于1.49 dB. 同时, 该系统考虑了户外防护、防雷及电磁兼容设计, 具有较高的可靠性. 另外, 开发了自动化电波环境测量及监控软件和基于HDF5的数据处理及成图软件, 实现自动化频谱监测及高效数据处理及分析.

关键词 射电望远镜, 无线电环境, 电磁干扰, 频谱监测

PACS: 95.55.Jz, 95.45.+i, 02.40.Pe

1 引言

随着我国国民经济的发展, 频率资源使用率越来越高, 移动通信、广播电视、微波接力、气象雷达、飞机导航、卫星通信等无线通信业务频率覆盖越来越宽^[1], 物联网、云计算、下一代通信技术将在智慧城市、智慧旅游^[1]建设中不断推广及应用; 数字化、智能化、便携式/移动式无线通信设备在人们生活中应用越来越广泛, 电磁环境有不断恶化的趋势.

射电望远镜具有极高的系统灵敏度, 例如, 目前L,

S, C波段的系统噪声温度只有几十 K^[2], 随着空间无线电技术的发展及望远镜建设过程中各类电子设备的不断引入, 电磁环境变得尤为复杂^[3], 射频干扰对射电天文观测的影响越来越大. 台址内外电磁干扰通过天线旁瓣进入接收系统^[4], 降低系统信噪比, 恶化观测数据, 也加大了处理数据的复杂性^[5,6].

Square Kilometer Array (SKA)国际工程小组认识到台址干扰监测与评估的重要性, 2003年制定了SKA选址Radio Frequency Interference (RFI)测试协议^[7], 该电波环境测试方法在国际射电望远镜选址中得到较多

1) <http://baike.sogou.com/v41302001.htm?fromTitle=智慧旅游>.

引用格式: 刘奇, 王玥, 刘晔, 等. QTT台址自动化电波环境监测系统. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099512

Liu Q, Wang Y, Liu Y, et al. Automatic radio environment measurement system for QTT site (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 099512, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0012](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0012)

应用, 如澳大利亚ASKAP和南非SKA^[8,9]、荷兰WAST和LOFAR^[10,11]、印度尼西亚^[12]、中国Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST)和新疆110 m全可动射电望远镜^[13-17]等. 该电波环境测试方法对于射电天文台站前期选址及电波环境综合评估具有一定的优势, 但针对正在建设和正在运行的天文台站进行电波环境测试, 缺乏信号的实时性信息.

新疆天文台即将建设的110 m口径全向可动射电望远镜(Qi Tai Radio Telescope, QTT), 工作频段为150 MHz–115 GHz, 其特点是高灵敏度、大天区和宽频覆盖, 与国内现有的射电望远镜形成很强的互补^[17]. QTT台址需装备自动化电波环境监测系统, 实现电磁干扰的长期监测, 为望远镜建设及运行阶段系统电磁兼容性设计、干扰缓解策略制定、台址无线电管理提供重要依据.

2 电波环境监测系统设计

2.1 系统设计需求分析

(1) 监测频段: 考虑到QTT主要工作频段为150 MHz–115 GHz, 结合地面无线电业务主要集中在12 GHz以下, 电波环境监测频段设计为100 MHz–12 GHz.

(2) 灵敏度要求: 电波环境监测系统需具有较高的灵敏度, 实现台址微弱信号的测量, 电波环境重点监测频段为100 MHz–6 GHz, 要求此监测频段系统噪声温度小于300 K.

(3) 测量需求: 电波环境监测需包含水平极化测试和垂直极化测试, 且测量数据需覆盖360°范围, 确保测量数据的完整性.

(4) 数据校准: 电波环境监测数据需进行严格校准, 获得测量天线口面处场强; 故系统设计时需考虑数据校准方法, 确保测量数据的准确性.

(5) 自动化监测: 为确保台址电波环境长期监测, 监测系统需具备全自动化监测功能.

(6) 可靠性考虑: 监测系统安装于户外, 系统安装运行需实现防雨、接地、避雷、电磁防护、抗风等功能, 以满足户外、高海拔环境下正常工作.

2.2 系统硬件链路设计

监测系统由测量天线、射频接收模块(RF box)、

天线云台、高靠可性升降装置、信号分析仪、线性电源、云台控制器、计算机等组成, 如图1所示. 测量天线采用R&S HL033和R&S HL050定向天线, 工作带宽分别覆盖100 MHz–2 GHz及2–12 GHz频段, 满足监测系统工作频率要求. 天线云台采用日本八重洲G5500, 适用于户外工作, 具有较高的可靠性, 满足360°方向水平转动及水平、垂直极化切换需求. 信号分析仪(R&S FSW13)、控制计算机、云台控制器等安装于屏蔽机柜内, 避免自身电磁干扰影响测量结果.

2.3 射频接收模块设计

射频接收模块是电波环境监测系统的核心部分, 该模块微波链路如图2所示, 分为0.1–2 GHz, 2–6 GHz, 6–12 GHz 3个微波测量链路. 采用两个标准噪声源(Keysight 346C)对0.1–2 GHz, 2–12 GHz微波链路系统增益和系统噪声温度进行测量. 通过低损耗微波开关实现微波链路选取. 选用美国Miteq低噪声放大器确保监测系统拥有较好的灵敏度. 2 GHz以上频段增加

图1 (网络版彩图)监测系统硬件框图

Figure 1 (Color online) Block diagram of RFI monitor system.

图 2 (网络版彩图)射频接收模块微波链路

Figure 2 (Color online) Microwave links of RF box.

K&L高通滤波器, 减少低频电磁干扰对测试结果的影响, 同时滤波器两端口增加2 dB衰减器, 减少端口驻波. 射频接收模块输出通过20 m低损耗同轴电缆接入高性能R&S FSW13信号分析仪, 同轴电缆两端各增加5 dB衰减器, 减少长电缆两端的驻波. 另外, 射频接收模块内嵌入2个温度传感器和1个湿度传感器, 用于监控噪声源位置温度和户外环境温度, 分析温度对测量不确定度的影响, 提高测量数据校准精度; 同时通过湿度传感器确定射频接收模块内部是否进入水汽, 影响内部器件性能, 提高监测系统的可靠性. 射频接收模块中关键微波器件性能参数见表1.

为最大限度提高监测系统灵敏度, 射频接收模块微波器件的集成与安装采用极紧凑型方案^[18], 尽量缩短馈线长度, 减少半刚性电缆插入损耗对系统噪声温度的贡献, 尤其是2–12 GHz高频链路. 射频接收模块

内所有微波器件包括4个低噪声放大器、2个噪声源、1个高通滤波器、5个微波开关、电源及微波切换控制板等均集成于狭小的空间内, 集成后的射频接收模块如图3所示, 采用双层板设计, 四面均可安装微波器件, 极大增加空间利用率. 为提高射频接收模块的可靠性, 集成过程所有微波器件关键参数均进行测量, 确保器件性能; 另外, 所有制作的半刚性电缆在安装之前均进行测量, 确定其插入损耗和反射系数性能优异. 其次, 射频接收模块考虑了户外防水设计和电磁兼容设计, 并安装防水呼气器件, 确保射频接收模块内部与外部气压一致, 抑制水汽进入, 影响内部器件性能及系统整体可靠性.

2.4 系统现场安装

电波环境监测系统(图4)安装点位于北纬43°36′

表 1 微波器件性能参数

Table 1 Parameters of microwave devices

Microwave devices	Frequency (GHz)	Technology property
Antenna_1	0.08–2	Typ. 6.5 dBi, VSWR ≤ 2, linear
Antenna_2	0.85–26.5	Typ. 8.5 dBi, VSWR ≤ 2.5, linear
LNA_1	0.1–2	~39 dB gain, N.F. < 1.2 dB, output P1dB: 13 dBm
LNA_2	2–6	~43 dB gain, N.F. < 1.5 dB, output P1dB: 27 dBm
LNA_3	6–12	~35 dB gain, N.F. < 1.2 dB, output P1dB: 10 dBm
LNA_4	0.1–12	~16 dB gain, N.F. < 2.5 dB, output P1dB: 8 dBm
HP filter	2–12	2 GHz high pass filter, insertion loss < 1.4 dB @ 1.3 GHz
Microwave switch	DC–18	VSWR max < 1.2 @ 3 GHz; insertion loss Max = 0.2 dB
Noise source	0.01–26.5	VSWR < 1.25; ENR 15 dB
Spectrum analyzer	0.001–13	–156 dBm (1 Hz) & 2 GHz
Rotator	–	Azimuth: 450 azimuth and 180° elevation

图 3 (网络版彩图)射频接收模块
Figure 3 (Color online) RF box.

图 4 (网络版彩图)电波环境监测系统
Figure 4 (Color online) RFI monitor system.

22°.98, 东经89°41'14".91, 测量天线处海拔约1780 m, 周围无遮挡, 能够很好地监测台址外电磁干扰. 测量天线距离地面约8.5 m, 此高度能够有效抑制地面杂散信号对测量结果的影响. 监测系统安装于高可靠性升降装置上, 该升降装置承载50 kg, 并满足8级抗风要求, 具有较好的可靠性. 另外, 考虑到台址为多雷区, 设计了避雷装置, 并在设备房的配电柜中增加了浪涌保护器. 数据采集和控制设备安装于设备房内的屏蔽机柜

中, 监测系统配备了小型UPS, 确保断电情况下监测系统正常工作8 h, 采用屏蔽丝网将UPS整体进行包裹, 减少UPS电磁干扰对测量结果的影响. 系统还设计了简易接地网, 实测接地电阻约4 Ω , 设备房内电源及设备进行有效接地, 提高监测系统可靠性.

2.5 系统性能测试

系统性能测量基于标准噪声源Keysight 346C, 采用Y因子法^[2,3], 超噪比ENR定义为噪声源开关之间的温度差与标准温度的比值:

$$ENR = \frac{T_{on} - T_{off}}{T_0}, \quad (1)$$

式中, 标准温度 T_0 为 290 K, T_{off} 为噪声源关闭状态时温度, T_{on} 为噪声源工作状态时温度. Y因子定义为标准噪声源开与关时器件的输出功率比:

$$Y = \frac{P_{on}}{P_{off}}, \quad (2)$$

式中, P_{on} 为噪声源打开时测试仪输出功率, P_{off} 为噪声源关闭时输出功率. 噪声系数NF通过公式(3)进行计算:

$$NF = \frac{ENR}{Y-1} \left(\frac{T_0}{T_{off}} \right). \quad (3)$$

噪声温度 T_R 为

$$T_R = T_0 \left(\frac{ENR}{Y-1} - 1 \right). \quad (4)$$

系统增益 G_R 按照公式(5)进行计算, 其中 K 为玻尔兹曼常数, B 为信号分析仪中频带宽:

$$G_R = \frac{P_{on}}{KB(T_{on} + T_R)}. \quad (5)$$

信号分析仪输出28 DV为噪声源供电, 通过计算机控制信号频谱仪电源, 获得噪声源开、关状态下的典型频点功率, 依据标准噪声源的ENR, 按照公式(3)和(5)计算系统噪声系数和系统增益. 电波环境监测过程中, 每个指向测量前均对系统性能进行测量, 图5给出了1天24小时系统增益和系统噪声系数测量结果, 测量结果表明6 GHz以下频段, 系统增益大于40 dB, 系统噪声系数小于2 dB, 对应的噪声温度为170 K, 满足高灵敏度设计要求, 具备微弱信号的检测能力. 图中系统增益和系统噪声系数的浮动主要来自环境温度变化的影响.

图 5 (网络版彩图)监测系统性能参数测试. (a) 系统增益; (b) 系统噪声系数

Figure 5 (Color online) Performance parameters of RFI monitor system. (a) System gain; (b) system noise figure.

2.6 测量不确定度分析

由公式(5)的确定系统增益 G_R 为

$$G_R = P_{on} - 10\lg(T_{on} + T_R) - 10\lg(B) - 10\lg(K) - 30, \quad (6)$$

$$T_{on} = T_o (ENR - 1), \quad (7)$$

从公式(4), (6), (7)可以看出, 系统增益与 ENR 的关系主要体现在

$$10\lg(T_{on} + T_R) = 10\lg(T_o) + 10\lg(ENR) + 10\lg\left(\frac{Y}{Y-1}\right), \quad (8)$$

公式(8)的推导结果表明, 系统增益不确定度由标准噪声源 ENR 不确定度决定.

监测系统测量不确定度分析如下: (1) 标准噪声源keysight 346C的超噪比 ENR 不确定度 <0.22 dB (100 MHz–7 GHz); 另外, 测量时 ENR 随温度变化为 0.01 dB/ $^{\circ}\text{C}$ ²⁾, 冬天、夏天噪声源位置温度统计结果温差约为 45° , 故噪声源 ENR 随温度变化不确定度为 0.45 dB; 其次, ENR 随供电电压变化不确定度为 <0.02 dB. 所以, 采用 Y 因子法测量系统增益时, 测量不确定度为 0.69 dB. (2) 测试系统使用的信号分析仪为R&S FSW13, 此信号分析仪8 GHz以下频段总测试不确定度为 0.4 dB³⁾.

综上所述, 采用标准噪声源校准获得系统链路的增益, 系统增益不确定度为 0.69 dB, 系统增益测量时, 信号分析仪的测量不确定度为 0.4 dB; 另外, 运用信号分析仪进行电波环境测量, 测试不确定度为 0.4 dB; 故该系统长期监测数据7 GHz以下频段测量不确定度为

1.49 dB.

3 测量方法及数据处理

3.1 关键参数设置考虑

依照电波环境监测系统微波链路带宽配置, 结合文献[2]给出的电波环境测量信号分析仪关键参数设置方法, 并考虑重点关注的电波环境监测频段, 信号分析仪关键参数设置见表2. 表中 RBW 为信号分析仪中频分辨率带宽, VBW 为视频分辨率带宽, $SPAN$ 为信号分析仪每屏扫描宽度, $SPAN.P$ 为每个 $SPAN$ 采集的点数, $SPAN.ST$ 为每个 $SPAN$ 单次扫描时间; 测量时每个 RBW 内采集1个点, 故单个 $SPAN$ 扫描带宽为 $SPAN.P \times RBW$.

为确保QTT台址各类电磁干扰信号的有效监测, 信号分析仪检波器选取考虑如下: (1) 对于相对固定的干扰信号采用采样检波器+线性平均的测量模式, 通过对每次扫描的Trace进行线性平均, 降低频谱噪声, 提高微弱信号的检测能力, 测量时依照表2配置信号分析仪的平均次数. (2) 采用最大值检波器+线性平均测量模式检测相对固定信号的极大值, 评估电磁干扰的极大值对射电天文观测的影响. (3) 采用最大保持模式捕捉瞬态信号, 分析瞬态信号特征、来源以及瞬态信号对射电天文观测的影响.

3.2 测量时间规划及测量方法

上一节给出了信号分析仪关键参数的配置方法, 依据表2给出的单个 $SPAN$ 扫频时间和平均次数, 可计算出不同频段的测量时间, 进一步计算出单个方向全

2) <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/00346-90148.pdf?id=1000002290-1:epsg:man;>

3) [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FSW_dat-sw_en_5215-6749-22_v0200.pdf.](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FSW_dat-sw_en_5215-6749-22_v0200.pdf)

表 2 信号分析仪关键参数设置

Table 2 Key parameters setting for spectrum analyzer

频率范围 (GHz)	<i>RBW</i> (kHz)	<i>VBW</i> (kHz)	<i>SPAN.P</i>	<i>SPAN.ST</i> (ms)	平均 次数
[0.1–0.4)	1	3	30001	60	150
[0.4–2)	30	300	30001	300	500
[2–6)	100	300	30001	150	400
[6–12)	300	1000	20001	127	250

频段测量时间约为10 min. 每个方向测试前需进行系统性能参数测量, 包括系统增益、系统噪声系数、环境温度、射频接收模块内部温度湿度等; 系统增益用于校准此次测量的数据, 通过系统噪声系数验证系统性能可靠性. 另外, 考虑到天线转动、系统性能参数测量、数据处理及存储的时间消耗, 每个方向的实际测试时间约为12 min.

采用准实时电波环境测量方法^[2], 1轮测试包括6个测量方向, 覆盖360°范围, 测量时间为72 min, 即单一方向的时间分辨率72 min, 1天24小时测量19轮数据, 通过准实时测量分析电磁干扰随时间的变化. 电波环境监测包括水平极化测试和垂直极化测试, 单个测量模式包括水平极化测量1 d, 垂直极化测量1 d; 电波环境监测包括采样检波测量模式、最大值检波测量模

式、最大保持测量模式, 故一个测量周期测量时间共计6 d; QTT台址长期频谱监测依照上述测量方法重复进行.

3.3 数据校准

按照公式(9)对测试数据进行校准, 获得测试天线口面处功率, 式中 P_{SA} 为频谱仪显示功率, G_A 为测试天线增益, G_S 为监测系统增益. 依照公式(10)将功率(单位为dBm), 转换为场强, 单位为dBμV/m; 式中 AF 为天线因子:

$$P = P_{SA} + G_A + G_S, \quad (9)$$

$$E = P + AF + 107. \quad (10)$$

3.4 数据存储

依据3.2节给出的测量方法, 频谱监测过程涉及的数据如图6所示, 主要包括: 来自天线云台位置数据、射频接收模块内温度、湿度及环境温度数据、采用标准噪声源对系统不同微波链路性能测量数据以及来自信号分析仪的全频段的频谱监测数据. 监测数据分为4个频段, 每个频段6个测试方向, 且包括水平极化和垂直极化方向, 所有的频谱序列对应的系统性能数据经过有效性检验, 满足灵敏度要求的频谱序列及其

图 6 (网络版彩图)监测系统数据存储

Figure 6 (Color online) RFI data storage.

对应的相关数据存入至HDF5数据文件, 数据处理及成图调用HDF5数据源, 依照需求完成频谱分析及干扰信号特征分析.

HDF5数据格式及数据命名方式如图7所示, 每种测量模式的单次测量数据存入1个HDF5文件, 包括垂直极化数据和水平极化数据, 命名为测量时间+检波方式, 故一个测量周期包含3个HDF5数据文件. 每个HDF5数据文件由极化方式group、方向group、频段group、环境数据group以及各频段group中对应的dataset数组组成. 频段group对应的Dataset数组包括频谱序列和系统性能参数测量数据; 频谱序列dataset命名方式为Test_测量时间_方向_轮次. 环境数据group包括测量时间、温度、湿度等dataset数组.

4 自动化频谱监测

4.1 测量及监控软件

自动化电波环境测量及监控软件的开发基于Microsoft Visual Studio 2013开发环境, 采用C++编程语言. 依据频谱监测功能需求, 软件功能主要包括测量功能、调试功能及系统关键参数监控功能. 测量功能一键实现自动化测量, 涉及微波链路切换、天线云台控制、系统性能参数测量、环境数据读取、频谱测量、数据存储等. 调试功能主要用于系统安装调试、系统维护等. 系统关键参数监控功能主要监控频谱监测过程中系统性能参数(系统增益和系统噪声系数)、环境温度、射频接收模块内温度湿度、云台位置等信息, 确保监测系统工作过程中硬件和数据的可靠性. 另外,

采用多线程并行处理技术, 实现自动化测量和关键参数的实时监测.

4.2 数据处理软件

为了提高数据处理的效率, 开发了基于HDF5数据源的数据处理及成图软件, 该软件开发基于Matlab平台实现单方向不同时段数据处理和成图、单时段全方向数据处理和成图、某时刻全频段数据处理及成图. 另外, 考虑到HDF5数据格式索引的便利性, 实现需求频段对应dataset数据集的快速检索, 仅提取需要的数据进行处理和成图, 大大缩减数据处理和成图时间, 提高数据处理效率.

4.3 频谱分析的考虑

频谱分析重点关心不同频段干扰信号的来源、特征, 为进一步分析电磁干扰对射电天文观测的影响及干扰缓解提供依据. 主要考虑如下:

(1) 固定电磁干扰及其特征分析: 通过不同方向频谱成图, 如图8所示, 结合无线电频率划分, 分析固定电磁干扰来源、极化、信号强度、带宽等, 记录信号特征. 通过同一方向不同时段成图, 如图9所示, 分析固定信号是否随时间变化, 如白天晚上信号是否发生变化, 分析现有无线通信业务的主要工作时间, 及时确定是否出现新的电磁干扰信号.

(2) 瞬态电磁干扰及其特征分析: 瞬态电磁干扰分析主要考虑两类信号, 其一, 信号特征为脉冲电磁干扰, 此类信号对数据处理终端的时间分辨率要求极高, 而监测系统使用的信号分析仪并不满足要求, 故采用

图 7 HDF5数据格式

Figure 7 HDF5 format for RFI data.

图 8 (网络版彩图)不同方向成图

Figure 8 (Color online) Spectra mapping for different directions.

图 9 (网络版彩图)某方向瀑布图

Figure 9 (Color online) Waterfall mapping for one direction.

最大保持模式分析脉冲信号特征. 其二, 突发事件产生的电磁干扰, 如民航无线电通信业务用频较多, 是否使用存在不确定性, 通过最大保持模式更容易捕捉突发电磁干扰; 图10为采用最大值检波模式、采样检波模式及最大保持模式测量获得的某一方向不同时间的频谱图, 可以看出4350–4450 MHz频段(民航飞机高度测

图 10 (网络版彩图)不同测量模式信号检测

Figure 10 (Color online) Spectra obtained using different measurement modes.

量, 仅在起飞降落时使用)电磁干扰仅在最大保持模式下的某时间段检测到, 表明相关业务对射电天文观测产生影响, 且需要进一步测量评估相关信号对射电天文观测的影响.

5 结论

针对QTT台址开发了自动化、高灵敏度电波环境监测系统, 实现台址各类信号的有效监测, 为QTT系统电磁兼容性设计、台址无线电管理、消干扰策略提供重要数据支撑. 但是, 该系统依旧存在一些不足, 未来工作考虑如下: (1) 开发宽带、高时间分辨率信号处理终端, 应用于QTT台址频谱监测系统, 提高瞬态电磁干扰信号的检测能力; (2) 研究实时频谱干扰信号识别及统计算法, 集成于频谱监测系统, 提高频谱分析的效率; (3) 开发基于Web的频谱实时显示功能, 及时掌握QTT台址无线电环境变化.

参考文献

- 1 Yuan L, Liu Q, Sun Z W, et al. Detection and identification for electromagnetic interference of equipment area on-site (in Chinese). Chin J Radio Sci, 2017, 32: 650–656 [袁力, 刘奇, 孙正文, 等. 现场环境下设备区域电磁干扰检测与识别方法. 电波科学学报, 2017, 32: 650–656]
- 2 Liu Q, Wang N, Wang Y, et al. A quasi-real-time method for radio environment measurement of radio astronomical observatory (in Chinese). Chin J Radio Sci, 2017, 32: 718–724 [刘奇, 王娜, 王玥, 等. 射电天文台站准实时电波环境测量方法. 电波科学学报, 2017, 32: 718–724]
- 3 Liu Q, Wang K, Wang Y, et al. Measurements of radiation characteristics of a set of electronic backend devices for radio astronomy (in Chinese). Astron Res Tech, 2014, 11: 218–223 [刘奇, 王凯, 王洋, 等. 射电天文终端设备辐射特性测试. 天文研究与技术, 2014, 11: 218–223]
- 4 International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R RA 769-2. Protection criteria used for radio astronomical measurement. International Standard. 2003
- 5 International Telecommunication Union. Report ITU-R RA.2126. Techniques for mitigation of radio frequency interference in radio astronomy. International Standard. 2007
- 6 Liu Q, Chen M Z, Li Y, et al. An evaluation for electromagnetic radiation of electronic devices of telescope (in Chinese). Astron Res Tech, 2015,

- 12: 292–298 [刘奇, 陈卯燕, 李颖, 等. 射电天文台站电子设备电磁辐射评估. 天文研究与技术, 2015, 12: 292–298]
- 7 Ambrosini R, Beresford R, Boonstra A J, et al. RFI Measurement Protocol for Candidate SKA Site. SKA Memo Series. Technical Report. Working Group on RFI Measurements. 2003
- 8 Millenaar R P. SSSM System Design Considerations. Technical Report. Netherlands Institute for Radio Astronomy, 2005. ASTRON-RP-013
- 9 Paul J M. Measurements the RFI Environment of the South African SKA Site. Dissertation for Master Degree. Grahamstown: Rhodes University, 2007
- 10 Offringa A R, de Bruyn A G, Zaroubi S, et al. The LOFAR radio environment. *Astron Astrophys*, 2013, 549: A11, arXiv: [1210.0393](https://arxiv.org/abs/1210.0393)
- 11 Hans Van der M, Peter D. RFI Measurements at the WSRT. In: Proceedings of the RFI mitigation workshop. Groningen, 2010. PoS (RFI2010) 028
- 12 Taufiq H, Achmad M, Budi D. Radio frequency interference measurements in Indonesia. *Experim Astrono*, 2014, 37: 85–108
- 13 Peng B, Sun J M, Zhang H Y, et al. RFI test observations at a candidate SKA site in China. *Exp Astron*, 2004, 17: 423–430
- 14 National Astronomical Observatories of China. SKA Site Spectrum Monitoring (SSSM) Data Summary Report. Beijing, 2005
- 15 Li J B, Peng B, Sun J M, et al. Measurement method and analysis of electromagnetic environment in radio astronomic observatories (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2009, 24: 523–528 [李建斌, 彭勃, 孙建民, 等. 射电天文台站电磁环境测量方法及分析. 电波科学学报, 2009, 24: 523–528]
- 16 Li J B, Peng B, Liu D L. Site spectrum monitoring of electromagnetic environment for large radio telescope (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2015, 30: 378–382 [李建斌, 彭勃, 刘东亮. 大型射电望远镜电磁环境频谱监测. 电波科学学报, 2015, 30: 378–382]
- 17 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783–794]
- 18 Liu Q, Cao L, Wang K, et al. The RF receiver module for Radio environment measurement (in Chinese). China Patent. CN201610330072.1, 2016-10-26 [刘奇, 曹亮, 王凯, 等. 一种基于电波环境测试的射频接收机模块. 中国专利. CN201610330072.1, 2016-10-26]

Automatic radio environment measurement system for QTT site

LIU Qi^{1,2*}, WANG Yue¹, LIU Ye, LIU Feng, CHEN Mao-Zheng¹, WANG Na¹,
CAO Liang¹ & YAN Hao¹

¹ Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The proposed 110-m fully movable radio telescope (Qi Tai Radio Telescope, QTT) in Xinjiang province has extremely high system sensitivity. A good radio environment of QTT site is of importance for QTT scientific output. In order to ensure that all kinds of electromagnetic interference can be monitored effectively during QTT construction stage, an automatic and high reliability radio environment monitoring system was developed. According to the design requirements, the extremely high compact microwave device integration scheme was employed for radio frequency receiver model to improve the system sensitivity. System performance measured results show that the system gain is more than 40 dB below 6 GHz and the system noise figure is less than 2 dB. The measurement uncertainty is less than 1.49 dB below 7 GHz based on the analysis. Meanwhile, outdoor protection, lightning and electromagnetic compatibility designs were taken into account for high reliability. In addition, we developed an automatic spectrum measurement and performance monitor software and a data processing and mapping software based on HDF5 format, realizing automatic spectrum monitoring and high effective data processing.

radio telescope, radio environment, electromagnetic interference, spectrum monitor

PACS: 95.55.Jz, 95.45.+i, 02.40.Pe

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0012](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0012)