

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.02.019

靶场毫米波信号高灵敏度接收与测试新方法^{*}

陈曦^{1,**}, 许建中¹, 吴礼¹, 杨健²

(1.南京理工大学 电子工程与光电技术学院,南京 210094;2.解放军 73691 部队,南京 210014)

摘要:基于靶场毫米波测试中微弱信号(低至 -128 dBm)检测的实际需求,通过信噪比分析,采用外差式宽带多通道快速扫频复合信道化技术,在 W 频段实现了 -128 dBm接收灵敏度的测试系统。同时,设计了毫米波信标源并利用空间衰减理论,提出了一种 W 频段高灵敏度(-128 dBm)测试的新方法。理论分析表明,测试距离为 290 m、相应的衰减值为 -121.5 dB时,可提供功率最小达到 -128 dBm的 W 频段毫米波信号源。利用标定后的毫米波信号源进行外场实际测量,证明了该测试方法的可行性。

关键词:靶场测试;高灵敏度;毫米波源;空间衰减;微弱信号检测;W 频段;信噪改善比

中图分类号:TN06;TN850.7 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2013)02-0209-05

A Novel Approach of High Sensitivity Receiving and Testing for Range Millimeter-Wave Signal

CHEN Xi¹, XU Jian-zhong¹, WU Li¹, YANG Jian²

(1.School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;2. Unit 73691 of PLA, Nanjing 210014, China)

Abstract: According to the actual demand of weak signal (as low as -128 dBm) detection in millimeter-wave range test, through the analysis of signal-to-noise ratio (SNR), the W-band receiver system with -128 dBm sensitivity is realized by using the technology of super-heterodyne broadband multi-channel fast swept-frequency composite channelization. Meanwhile, the millimeter-wave calibration source is designed, and combined with the spatial attenuation theory, a new test method of the high sensitivity (-128 dBm) in W-band is put forward. Theoretical analysis shows that the minimum power of the millimeter-wave signal source can reach -128 dBm in W-band when the test distance is 290 m and the corresponding attenuation value is about -121.5 dB. The practical measurements using the calibrated millimeter-wave signal source demonstrate the feasibility of the proposed test method.

Key words: range test; high sensitivity; millimeter-wave source; spatial attenuation; weak signal detection; W-band; signal to noise interference ratio

1 引言

毫米波武器的飞速发展大力推动了靶场毫米波测试设备和技术的研究,实现靶场毫米波信号监测和武器系统的定型试验^[1-2]。由于靶场测试中被测

目标通常处于运动状态中,并且有被测弹载毫米波系统工作在被动状态,获得的毫米波信号非常微弱,因此对测试系统的接收机灵敏度要求很高。目前国际上先进水平为 W 频段测试系统可达到 -128 dBm接收灵敏度^[3],但由于西方国家在高端研究领域对

* 收稿日期:2012-08-24;修回日期:2012-10-16 Received date:2012-08-24;Revised date:2012-10-16

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20100481151)

Foundation Item: China Postdoctoral Science Foundation(20100481151)

** 通讯作者:10cx14@163.com Corresponding author:10cx14@163.com

我国实行技术封锁与设备禁运,国内靶场的毫米波测试技术与国外相比还存在很大差距,如文献[4]中实现了灵敏度指标为 -120 dBm的 W 频段高灵敏度接收机系统。同时,由于国内毫米波频段(特别是 W 频段)测试仪器匮乏,且尚无40 GHz以上系统整体性能的测试标准和条件[5],因此对灵敏度指标苛刻的 W 频段测试系统性能的检测和标校存在空白。

为了实现国内在 W 频段该测试领域的突破,本文采取外差式宽带多通道快速扫频复合信道化的微弱信号检测技术并采用国际上 W 频段噪声系数指标领先的低噪声放大器,研制了接收机灵敏度达到 -128 dBm的 W 频段测试系统。同时,采用毫米波信标源和空间衰减相结合的方法,提供了一个功率最小达到 -128 dBm的 W 频段毫米波微弱信号源,实现对系统整机接收灵敏度的检测和标校。

2 毫米波微弱信号检测

2.1 检测方法

对微弱信号的检测关键在于抑制噪声,提高信号检测的灵敏度,即提高检测系统的信噪改善比(Signal to Noise Interference Ratio, SNIR)。

噪声是限制接收机灵敏度的根本原因,对于接收机噪声系数,第一级设计至关重要。为了提高整机接收灵敏度,在接收前端加入前置低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)。根据目前毫米波部件水平,接收前端的 W 频段单级毫米波 LNA 的噪声系数为 $6 \sim 9$ dB,增益为 20 dB;W 频段混频器的噪声系数为 $6 \sim 8$ dB[6]。考虑两级级联及第一级混频后的总噪声系数为[7]

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} \quad (1)$$

式中, F_1 为射频传输损耗产生的噪声系数(取 2 dB), G_1 为传输线射频损耗引起的增益(取 -5 dB), F_2 为第一级 LNA 的噪声系数(取 7 dB), G_2 为第一级 LNA 的增益(取 20 dB), F_3 为第二级 LNA 的噪声系数(取 8 dB), G_3 为第二级 LNA 的增益(取 20 dB), F_4 为第一级混频器的噪声系数(取 7 dB),故可得总的噪声系数为 $F = 11.6$ dB。

由式(1)可知,对系统噪声系数影响最大的主要是前端的射频传输损耗和毫米波 LNA,因此为了保证有效降低系统噪声系数,本文采用了目前国际上 W 频段噪声系数指标领先的低噪声放大器部件。

灵敏度的概念源于雷达方程中的最小可检测信

号功率,即信噪比等于 1 时的最小输入信号功率。接收机灵敏度越高,表明接收微弱信号的能力越强。接收机系统灵敏度可用下式进行计算[8]:

$$P_{Smin} = kT_o B_{RF} F \quad (2)$$

式中, k 为波尔兹曼常量(1.38×10^{-23} J/K), T_o 为接收机工作温度(取 290 K), B_{RF} 为接收机线性部分的通频带(接收机高、中频部分的总通频带)。

由式(2)可知,若被测信号电平非常微弱,需要降低接收机的通频带带宽以提高系统接收灵敏度,因此要满足接收最小信号 -128 dBm的要求,计算可得接收机通频带带宽要小于 3 kHz。

在 W 频段实际接收的信号通频带为 6 GHz,因此为了提高系统接收机灵敏度,本文采取信道化处理技术,考虑到余量,设计信道化接收机的最小分辨率带宽为 1 kHz。但直接把 6 GHz的通道转化成 1 kHz的通道需要 6×10^6 个信道,工程实现困难。考虑到被测信号有一定的驻留时间,因此采取时间换空间的办法,即首先采用外差方法把宽带信号搬移到带宽相对较小的中频带宽,再利用扫频频综与待测信号进行混频,在时间上把大带宽划分成小带宽的子带,通过两级的处理从而达到 1 kHz的信道带宽,这样可以大大减少信道数。

同时,由于动态测试速度要求和信号散布带宽较大,本文采用直接数字频率合成(Direct Digital Frequency Synthesizer, DDS)扫频结合信道化接收的处理方法。具体实现方法为将待测信号 1 GHz的散布带宽利用扫频频综划分为 200 MHz的子带分时处理,每个 200 MHz的子带再利用信道化技术划分为 10 个并行的 20 MHz通道,每个通道采用锁相频率合成(Phase-Locked Loop, PLL)频综进行扫频,步进 1 MHz,并行完成 20 点/通道的扫频任务。为进一步提高信道化的处理速度,对于每个 1 MHz频点采用 DDS 进行快速扫频检测,检测带宽 1 kHz/step,利用晶体滤波器组完成精细窄带滤波,将中频接收机带宽减小到 1 kHz,保证了检测灵敏度,同时利用 DDS 快速的特点,使得 1 MHz内每 1 kHz的扫频时间小于 $1 \mu s$,保证整个信道化接收机的响应速度优于 50 ms/ 200 MHz。

2.2 信噪改善比分析

微弱信号检测系统的信噪改善比等效于输入噪声带宽与系统的噪声等效带宽之比,SNIR 越大,表示处理噪声的能力越强,对微弱信号检测的水平越高。

当天线的辐射电阻与接收机的输入电阻匹配时,根据功率与温度的对应关系,输入端总噪声功率

可计算为

$$P_n = k(T_e + T_o)B = kT_oFB \quad (3)$$

式中, $T_e = (F - 1)T_o$ 为等效噪声温度。最小输入信号电平取 $P_{in} = -128$ dBm, 故接收机输入端信噪比为

$$I_{SNR_in} \geq P_{in}/P_n = -63.4 \text{ dB} \quad (4)$$

考虑到后端信号处理(如被动监测时射频频率的测量), 取 $I_{SNR_out} = 4$ dB, 则由定义可知整个系统的信噪比改善因子应满足 $I_{SNIR} \geq 67.4$ dB。

由 2.1 小节分析可知, 设接收机噪声服从正态分布(高斯白噪声), 输入噪声带宽近似视为射频带宽 $B = 6$ GHz, 而信道化接收机最小分辨率带宽 Δf_{min} 为 1 kHz, 则信道化接收机可提供的最大信噪比改善因子 SNIR 可表示为

$$I_{SNIR_max} = \frac{B}{\Delta f_{min}} = 67.8 \text{ dB} \quad (5)$$

由式(5)可知, 本文采取的外差式宽带多通道快速扫频复合信道化的微弱信号检测方法可以提高信噪比 67.8 dB, 从而实现对 W 频段微弱信号 (-128 dBm) 可靠地检测并解调出相应的参数。

3 系统灵敏度测试方法

3.1 测试原理

系统接收机灵敏度是一个综合性指标, 检验系统整机满足接收机灵敏度指标要求则隐含了该系统的其他指标也满足指标要求。目前对系统灵敏度的测试方法是在实验室环境下采用已知的标准功率信号源, 经过精密衰减后加到接收机输入端进行检测^[9]。但在 W 频段, 缺乏高精度的衰减器和性能良好的隔离器, 信号源的泄漏功率较大, 与经过衰减器输出的能量相接近甚至更强; 且根据室内测量结果经验可得, 当衰减值大于 90 dB 时, 其衰减作用明显减弱, 即毫米波信号将不再随衰减值增大而减弱。因此, 对于 W 频段测试系统接收机灵敏度为 -128 dBm 的指标进行检测, 关键是提供一个功率最小达到 -128 dBm 的 W 频段毫米波微弱信号源。

本文在设计并研制了一个毫米波信标源的基础上, 根据空间衰减原理, 利用现有条件设计了接收机灵敏度测试实验方案, 测试原理如图 1 所示。该方法将毫米波信标源通过空间距离衰减, 并辅以一定衰减值的吸波材料, 共同实现毫米波信号监测系统测量要求所需的 -128 dBm 微弱毫米波功率信号。

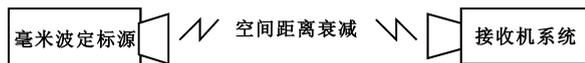


图 1 灵敏度测试原理

Fig.1 Sensitivity testing principle

设发射源功率为 P_t , 天线增益为 G_t , 则沿其波束轴离发射源距离为 R 处的功率密度(单位 W/m^2)为

$$I_s = P_t G_t / 4\pi R^2 \quad (6)$$

利用各向同性天线进行接收时, 天线有效口径面积为 $A_e = \lambda^2 / 4\pi (m^2)$, 则接收到的功率(单位 W)为

$$P_r = P_t G_r \lambda^2 / (4\pi R^2) \quad (7)$$

式中, λ 为工作波长。

可见, 由距离 R 引起的空间衰减 L_R 为

$$L_R = \lambda^2 / (4\pi R^2) \quad (8)$$

当工作波长 $\lambda = 3$ mm(W 频段)时, 忽略大气衰减影响, 其空间距离衰减 L_R 与距离 R 对应的关系如图 2 所示。

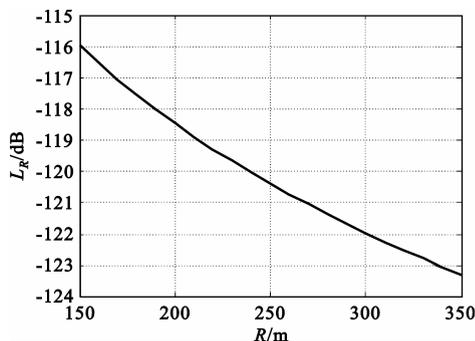


图 2 空间衰减与距离关系曲线图

Fig.2 Relationship between spatial attenuation and distance

由图 2 可以看出, 当距离范围在 150 ~ 350 m 内时, W 频段对应的空间距离衰减 L_R 值大致范围为 -116 ~ -123 dB, 满足远小于 -90 dB 的条件。

3.2 毫米波信标源

信标源由毫米波功率源、标准天线、固定衰减器、多层吸波材料及电源等组成, 其简化的结构示意图如图 3 所示。毫米波功率源采用进口 W 频段标准源, 其工作频率选择在被测毫米波信号监测系统接收机频带中间, 功率 P_t 的量级为 0 ~ 20 dBm。毫米波天线采用标准喇叭天线, 增益一般选 $G_t \approx 20$ dB。固定衰减器采用标准宽带固定衰减器, 衰减值一般选 $L_D = 30 \sim 40$ dB。毫米波功率源信号通过天线辐射后, 再经吸波材料及距离衰减到达毫米波信号监测系统接收机天线口面, 其中采用平板吸波材料, 通过增减平板吸波材料层数或厚度, 可调整衰减值 L_M , 以满足被测系统的测试灵敏度要求。

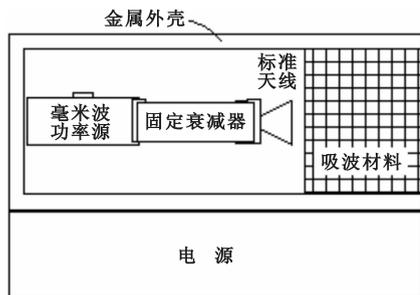


图3 毫米波信标源结构示意图

Fig.3 Structure diagram of the millimeter-wave calibration source

20°,在测试距离范围内及两边距离30 m范围内,没有高出场地平面的金属物、建筑物和树木等障碍物。

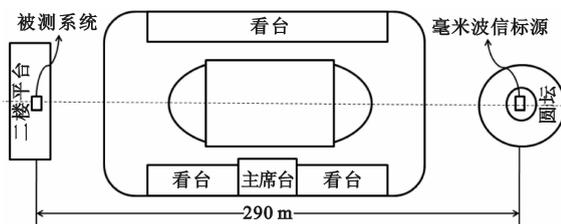


图4 系统灵敏度测试布站示意图

Fig.4 Station diagram of system sensitivity test

4 实验与结果

采用上述测试方法对毫米波信号监测系统整机的接收灵敏度进行测量的具体步骤如下所述。

(1)首先,在实验室环境对毫米波信标源进行标定。具体为采用毫米波频率计和功率计分别对毫米波功率源的频率 f_0 和功率 P_t 进行测定。吸波材料衰减值 L_M 标定采用实际功率源、功率计等在电波暗室中测定。毫米波标准天线增益 G_t 、固定衰减器衰减量 L_D 由供货厂商提供,并根据实际工作频率确定。经过一次标定后信标源各参数如表1所示。

表1 毫米波信标源各参数

Table 1 Parameters of the millimeter-wave calibration source

| 频段 | f_0 /GHz | P_t /dBm | L_D /dB | G_t /dB | L_M /dB |
|------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| W 频段 | 94.53 | 10.0 | -30.0 | 19.5 | -32.9 |

(2)基于毫米波信标源的参数标定值,可对外场实验时测试距离的选择进行分析计算。已知接收机接收功率(单位 dBm)等效为

$$P_A = P_t + L_D + G_t + L_M + L_R + G_r \quad (9)$$

式中,接收天线增益 $G_r = 26$ dB(实测数据平均值)。为了使到达被测毫米波信号监测系统天线口面的毫米波信号功率的灵敏度满足 -128 dBm的要求,将表1中具体参数代入式(9),结合式(8)或图2结果计算可得,测试距离为290 m时,W 频段的空间距离衰减 L_R 约为 -121.5 dB,此时接收机接收功率为 -128.9 dBm。

(3)进行自由空间测试场的布站。根据步骤(2)可知,被测毫米波信号监测系统与毫米波信标源应安放在相距290 m位置上,实际测试场地选为在南京理工大学田径场进行,布站示意图如图4所示。其中被测毫米波信号监测系统放置在二楼平台上,毫米波信标源放置在对面垂直高度相近的圆坛上,或反之。测试距离根据实测和卫星照片测距来调整。为了保证标校精度,测试时天气为晴朗无风,环境温度约为

(4)根据步骤(1)~(3),在满足测试条件下,对系统灵敏度进行多次测量,表2给出了部分实际测试数据。实测结果表明,到达接收机天线口面处的场强平均值为 -128 dBm。

表2 W 频段系统灵敏度测试数据

Table 2 Test data of W-band system sensitivity

| 次数 | 频率/MHz | 场强/dBm |
|----|----------|--------|
| 1 | 94 524.7 | -128.0 |
| 2 | 94 523.1 | -128.0 |
| 3 | 94 523.1 | -128.0 |
| 4 | 94 523.1 | -128.0 |
| 5 | 94 523.1 | -128.0 |
| 6 | 94 523.1 | -128.0 |
| 7 | 94 523.0 | -128.0 |
| 8 | 94 523.0 | -128.0 |
| 9 | 94 534.8 | -128.0 |
| 10 | 94 534.8 | -128.0 |
| 11 | 94 534.8 | -128.0 |
| 12 | 94 534.8 | -128.0 |
| 13 | 94 534.8 | -128.0 |
| 14 | 94 560.0 | -128.0 |
| 15 | 94 523.0 | -128.0 |
| 16 | 94 523.0 | -128.0 |
| 17 | 94 523.0 | -128.0 |
| 18 | 94 523.0 | -128.0 |
| 19 | 94 523.0 | -128.0 |
| 20 | 94 522.9 | -128.0 |
| 21 | 94 522.9 | -128.0 |
| 22 | 94 522.9 | -128.0 |
| 23 | 94 522.9 | -128.0 |
| 24 | 94 522.9 | -128.0 |
| 25 | 94 522.9 | -128.0 |
| 26 | 94 522.9 | -128.0 |
| 27 | 94 522.9 | -128.0 |
| 28 | 94 522.9 | -128.0 |
| 29 | 94 522.9 | -128.0 |
| 30 | 94 522.9 | -128.0 |

5 结论

本文基于国家靶场毫米波武器测试系统的实际需求,研究了毫米波微弱信号(低至 -128 dBm)的接

收与灵敏度测试方法。在信噪比分析的基础上,采用外差式宽带多通道快速扫频复合信道化技术,研制了接收机灵敏度达到 -128 dBm 的 W 频段测试系统。该技术指标的实现突破了国内在 W 频段现有的测试手段,从而可对靶场毫米波微弱信号进行可靠地检测并解调出相应的参数。

同时,针对目前国内不具备该灵敏度指标苛刻的 W 频段系统整机灵敏度测试条件的问题,提出了一种高灵敏度测试新方法。其核心是利用空间衰减理论并采用自行研制的毫米波信标源,提供一个功率最小达到 -128 dBm 的 W 频段毫米波标准信号源。通过在自由空间测试场的实际测量,证明了该方法的可行性,为我国靶场测试设备和技术提供了新的手段。

但是为了易于高灵敏度接收的实现,本文中接收机前端关键的低噪声放大器模块仍采用国外进口器件,不利于工程实现成本,后续将进一步研究 W 频段宽带低噪声放大器的设计问题。

参考文献:

- [1] 王伟,徐平,林德福. 制导武器靶场试验半实物仿真的现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2012(5):11-15.
WANG Wei, XU Ping, LIN De-fu. The Present Situation and Development Trend for Guided Weapons Range Test Semi-physical Simulation [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012 (5):11-15. (in Chinese)
- [2] 常军,杨勇,任培宏,等. 毫米波末制导技术的应用及发展趋势[J]. 电讯技术, 2008, 48(3):1-6.
CHANG Jun, YANG Yong, REN Pei-hong, et al. Application and Development of Millimeter Wave Terminal Guidance Technology [J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48 (3):1-6. (in Chinese)
- [3] Khanpour M, Tang K W, Garcia P, et al. A Wideband W-Band Receiver Front-End in 65-nm CMOS [J]. Solid-State Circuits, 2008, 43(8): 1717-1730.
- [4] 顾兴旺. 毫米波高灵敏度接收机设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
GU Xing-wang. Design of Millimeter-wave High-sensitivity Receiver [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] 中国计量科学研究院信电所. 18 GHz ~ 40 GHz 衰减基准装置 [S/OL]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局. (2006-04-20) [2011-07-26]. <http://www.nms.org.cn/Resource/PrimaryItem.aspx?id=498>.
National Institute of Metrology. 18 GHz ~ 40 GHz Attenuation Standard Device [S/OL]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. (2006-04-20) [2011-07-26]. <http://www.nms.org.cn/Resource/PrimaryItem.aspx?id=498>. (in Chinese)

- [6] 王坚, 候辉, 代红. 毫米波器件的技术发展与应用 [J]. 电讯技术, 2007, 47(1):4-6.
WANG Jian, HOU Hui, DAI Hong. Technical Development and Application of Millimeter Wave Devices [J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(1): 4-6. (in Chinese)
- [7] 羌琦, 邓凤军. 雷达接收机噪声特性研究分析 [J]. 价值工程, 2012, 31(8):187-188.
QIANG Qi, DENG Feng-jun. Research and Analysis of the Radar Receiver Noise Characteristic [J]. Value Engineering, 2012, 31(8):187-188. (in Chinese)
- [8] 罗凡, 沈金泉, 严明明. 雷达接收机灵敏度测试方法 [J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5):47-50.
LUO Fan, SHEN Jin-quan, YAN Ming-ming. Test Method of Receiver Sensitivity for Radar [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(5):47-50. (in Chinese)
- [9] 杨培. W 频段辐射计及其性能参数测试分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
YANG Pei. W-band Radiometer and its Performance Test and Parameter Analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

作者简介:



陈曦(1984—),女,江苏徐州人,2007年于中北大学获通信工程专业学士学位,现为博士研究生,主要研究方向为靶场毫米波测试技术及信号处理;

CHEN Xi was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1984. She received the B.S. degree in Communication Engineering from North University of China, in 2007. She is currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns millimeter-wave testing technology of range and signal processing.

Email: 10cx14@163.com

许建中(1958—),男,江苏无锡人,1982年于南京理工大学获学士学位,现为教授,主要研究方向为毫米波探测与目标识别技术;

XU Jian-zhong was born in Wuxi, Jiangsu Province, in 1958. He received the B.S. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1982. He is now a professor. His research interests involve millimeter-wave detection and target recognition.

吴礼(1981—),男,江西宜春人,2008年于南京理工大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为毫米波主、被动探测技术及信号处理;

WU Li was born in Yichun, Jiangxi Province, in 1981. He received the Ph.D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2008. He is now a lecturer. His research concerns millimeter-wave active/passive detection technology and signal processing.

杨健(1984—),男,安徽铜陵人,2010年于南京理工大学获硕士学位,现为助理工程师,主要研究方向为电磁频谱管理、信号监测与测量识别。

YANG Jian was born in Tongling, Anhui Province, in 1984. He received the M.S. degree from Nanjing University of Science and Technology, in 2010. He is now an assistant engineer. His research concerns electromagnetic spectrum management, signal monitoring measurement and identification, millimeter wave signal processing.