

雷达接收机脉冲灵敏度测试

吕贵洲, 梁冠辉, 朱 赛

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要: 灵敏度是衡量雷达接收机性能的重要指标, 传统非相参体制雷达通常测试接收机连续波灵敏度; 随着全相参脉冲体制雷达的发展, 脉冲灵敏度逐渐成为衡量接收机灵敏度性能的主要指标, 详细探讨了全相参接收机脉冲灵敏度测试原理, 分析了影响脉冲灵敏度测试结果的相参、触发和射频脉冲信号参数设置等因素, 结合某型雷达接收机分析了测试实例, 论述了测试系统组成、测试过程、注意事项和数据处理等内容, 对雷达接收机性能测试与装备保障具有较好的参考意义。

关键词: 接收机; 相参雷达; 灵敏度; 信噪比; 性能测试

Sensitivity Test Method of Radar Receiver

Lū Guizhou, Liang Guanhui, Zhu Sai

(Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The Sensitivity is a very important performance to level a radar receiver. People always test continuous wave Sensitivity when the radar adopted non-coherence mode. With the development of coherence pulse radar, Pulse Sensitivity becomes a more and more important specification to level the kind of radars. Many kinds of factors, such as coherence, trigger and parameter settings of radio-frequency pulse which will influence Pulse Sensitivity test results, are described. A test case which includes test procedure, matters needing attention, data procession and etc. for a certain type of radar receiver is prompted. The test method and test instance had referential meaning for radar receiver performance test.

Keywords: receiver; coherent radar; sensitivity; Signal-Noise rate; performance test

0 引言

接收机是雷达装备重要分系统, 其主要完成微弱的目标回波信号的功率放大和频率变换(通常为下变频)。根据雷达方程, 接收机能够识别的最小信号功率直接影响雷达的作用距离。雷达能够正常工作时的最小输入信号功率即为接收机灵敏度, 雷达接收机的灵敏度通常用最小可检测信号功率来表示。当接收机的输入回波信号大于某一电平, 接收机就能正常接收而在输出端检测出这一信号, 如果信号功率低于此值, 信号将被淹没在噪声之中, 不能可靠地检测出来。因此雷达接收机的灵敏度受噪声电平的限制^[1]。对雷达装备灵敏度进行测量能有效掌握接收机工作状态, 保证雷达正常工作, 保持相关部队战斗力。

雷达接收机灵敏度, 按灵敏度定义分为实际灵敏度和临界灵敏度, 按信号调制形式分为连续波灵敏度和脉冲灵敏度。针对不同雷达体制要选择合适的测量指标才能准确反映接收机实际特性。目前, 传统测量方法为连续波灵敏度测量, 针对的对象为非相参体制雷达接收机, 且通常为连续波模式; 近年来, 全相参脉冲体制雷达装备逐渐成为

雷达装备的主流, 而接收机脉冲灵敏度测试也逐渐替代连续波灵敏度测量。

1 实际灵敏度与临界灵敏度

雷达是基于信噪比的目标检测装备, 能够被雷达实际识别的最小回波信号功率称之为实际灵敏度, 即为了接收机输出端的信号噪声功率比为正常接收所必须的数值时, 天线上信号源电动势的最小有效值 E_{min} 或信号源的额定功率 P_{min} 。从信噪比角度分析, 所谓“正常接收”是指终端设备以一定的概率发现目标和满足测定目标坐标的精度。要能正常接收, 则接收机输出端信号噪声功率的比值 (S_o/N_o) 必须不小于一定的数值^[5]。

为了保证雷达正常接收, 接收机的中频输出端所必须提供的信号噪声功率比为雷达操作手识别目标所需数值时, 即 $\frac{S_o}{N_o} = M$ 时, 接收机输入信号额定功率就是最小可辨信号功率。实际灵敏度的表达式为:

$$P_i = kT_0 B_{Ri} \cdot F \cdot M \quad (1)$$

式中, $K=1 \times 10^{-23}$ 为玻尔兹曼常数; $T_0=290$ K; B_{Ri} 表示接收机高、中频部分的总通频带, F 表示接收机的噪声系数^[2], M 为识别系数。

实际灵敏度与输出信号的信噪比相关, 不同雷达操作手判断的标准不一, 因此其为接收机灵敏度的非客观表达。

国军标^[3]定义接收机线性输出端的信号噪声之比等于 1, 也即实际灵敏度表达式中识别系数等于 1 时的信号功率大小为临界灵敏度, 其表达式如下:

收稿日期:2019-03-11; 修回日期:2019-04-11。

作者简介: 吕贵洲(1977-), 男, 江苏睢宁人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电子装备测试与故障诊断、雷达工程和雷达信号处理方向的研究。

通讯作者: 梁冠辉(1981-), 男, 河南孟津人, 讲师, 主要从事武器装备系统仿真与电子装备性能测试方向的研究。

$$P_i = KT_0 B_{RF} F \quad (2)$$

显然临界灵敏度数值不受操作手水平的影响，其为接收机灵敏度的客观表达。

雷达接收机输入端的最小可分辨功率通常只有微微瓦数量级 ($10^{-12} \sim 10^{-14} \text{ W}$)，如此微弱的微波信号，用功率计测量是十分困难的，在工程上接收机灵敏度的测量不是直接测量接收机输入端的最小可分辨功率，而是采用已知功率标准信号源，经过精密衰减后加入接收机的输入端，保证输出端信噪比为 1 : 1，此时信号源输出的信号功率即为接收机的临界灵敏度。

2 非相参雷达连续波灵敏度测试

临界灵敏度表示接收机输出端信噪比为 1 : 1 时的输入信号功率，根据定义非相参雷达连续波灵敏度通常采用等幅信号测试法，测量原理如图 1 所示^[8]。

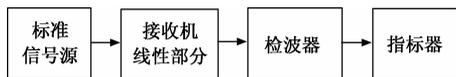


图 1 非相参雷达接收机连续波临界灵敏度测试框图

灵敏度测试关注的为接收机的线性部分，标准信号源用于产生符合接收机正常工作时功率、频率射频微波信号；检波器用于完成没有视频输出端口的接收机输出信号的包络检波，输出视频信号；指示器用于指示检波器输出的视频信号，察看噪声电平与模拟回波信号经接收机变换后的输出。

标准信号源置于单频、等幅输出工作状态，并调整其频率到接收机中心工作频率上，首先关闭标准信号源射频输出，调整接收机增益于适当位置，使指示器得到的噪声电平指示值为 A_1 ；将标准信号源输出一定的功率，并微调其频率使指示值最大；调节信号发生器的输出，使接收机输出的噪声电平指示值为 A_2 ，且使 A_2/A_1 的比值等效于功率比为 2 的数值；此时加到接收机输入端的信号功率，即为雷达接收机灵敏度值。

连续波灵敏度测试时，输入到接收机射频输入端的信号为连续波，但对于大多数工作于脉冲状态下的接收机，连续波状态没有体现出接收机应有的工作状态，尤其在输入射频信号带宽、存续时间特性与接收机脉冲工作状态要求明显不符，难以反映脉冲雷达接收机实际工作状态下的灵敏度。

其次，新型雷达通常采用全相参体制以保证雷达抗干扰效果，采用图 1 方法进行测量时，信号源与雷达之间没有实现相位同步，无法实现全相参体制的雷达接收机灵敏度测量。

另外，新型雷达装备生产厂家通常在履历书中给出脉冲灵敏度指标，针对以上情况，在雷达装备接收机中脉冲灵敏度测试需求越来越明显。

3 全相参雷达脉冲灵敏度测试

3.1 测试原理

新型雷达装备通常工作于相参体制下的脉冲状态，同

时为了保证接收机的安全，本振信号也常工作于脉冲状态，从接收机灵敏度的角度，接收机脉冲灵敏度更能准确地表达接收机接收微弱信号的能力。全相参脉冲体制雷达接收机脉冲灵敏度测试原理框图如图 2 所示^[9]。

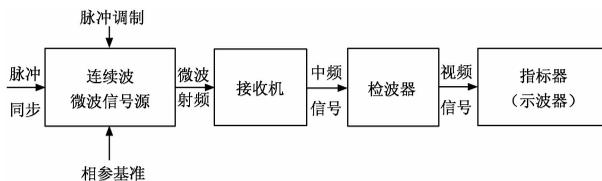


图 2 全相参接收机脉冲灵敏度测试框图

微波信号源的工作状态受到外部输入控制信号脉冲同步、脉冲调制和相参基准的控制，脉冲同步主要实现微波信号源脉冲输出延时时间控制，即雷达主触发脉冲作为微波信号源的同步信号，在信号源中可设置延迟时间，从而模拟不同距离上目标的回波信号；脉冲调制实现微波信号源的脉冲状态输出，即将微波信号源设置在脉冲工作状态，从而满足雷达脉冲目标回波的模拟；相参基准控制微波信号源输出微波射频信号的起始相位，使得输出微波信号与雷达不同重复周期主脉冲之间相位差固定，从而实现信号源输出微波信号与雷达信号相参，此时微波信号源和雷达装备构成一个完整的相参系统，实现全相参体制雷达回波的相参控制。与雷达接收机相参的微波射频脉冲信号送入接收机，经接收机放大、混频等处理后，经检波器得到视频信号，送脉冲示波器上进行输出指示。

首先把微波信号源的输出调至零，再调节接收机的增益控制，使接收机输出端的噪声电平符合雷达技术要求所规定的数值 A_1 ；其次，调节微波信号源的输出电平，使信号和噪声叠加后在示波器上显示的数值为 A_2 ，且使 A_2/A_1 的比值等效于功率比为 1。此时微波信号源的输出电平即为接收机的脉冲灵敏度。

图 2 所示的脉冲灵敏度框图为信号源品质较好，功率稳定度、频率稳定度、最小输出功率准确度较高时的测试方案，当信号源品质一般则在连续波微波信号源与接收机射频输入之间串一高精度无源步进衰减器，信号源输出固定功率为 P_r 射频信号，调整精密衰减器衰减量为使示波器上的信号电平与噪声电平相当，记衰减量为 A ，在不考虑通道衰减的情况下接收机的灵敏度计算公式为：

$$P_{\min} = P_r + A \quad (3)$$

3.2 测试实例

3.2.1 测试系统组成

某型雷达装备接收机采用二次混频全相参体制，工作在 X 波段，分为高频接收机和中视频接收机两个部分。高频接收机经一本振和二本振完成二次混频下变频，输出固定中心频率的中频信号，其中一本振为扫频本振其频率随射频工作频率变化而变化，二本振为固定频率单频信号。中视频接收机完成中频信号的功率放大和正交 I、Q 双路鉴相。射频回波信号经定向耦合器主通道进入接收机，接收

机处理回波信号输出 I、Q 两路视频信号, 雷达系统同时提供 10 MHz 相参基准、发射触发脉冲信号, 包含测试激励信号源和数字脉冲示波器指示器的测试系统基本框图如图 3 所示。

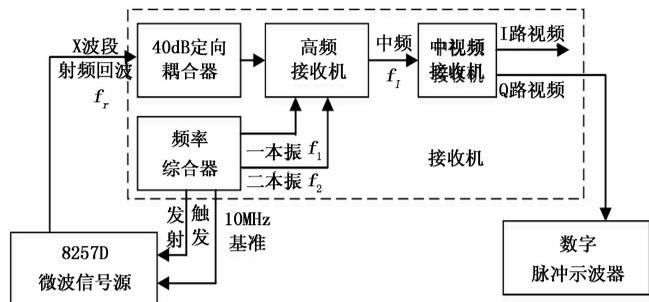


图 3 全相参接收机脉冲灵敏度测试框图

相参基准信号为该雷达装备整机相位基准, 其由 10 MHz 高稳定度晶振产生。发射触发脉冲为雷达装备的一个处理周期的时间零点, 用以控制射频回波脉冲时间延迟。

一本振为扫频本振、二本振为固定频率信号, 设置 8257D 微波信号源工作频率时, 需根据雷达工作频点计算一本振频率, 根据计算出的射频回波频率, 从而保证高频接收机输出的中频信号频率保持固定。计算公式如下:

$$f_r = f_1 + f_2 + f_i \quad (4)$$

其中: f_r 为模拟射频频率; f_1 为雷达当前一本振工作频点; f_2 为二本振频点; f_i 为高频接收机输出中心频率。

测试激励器采用安捷伦 8257D 模拟信号源^[6], 其工作频率范围为 250 kHz~26.5 GHz, 频率分辨率 0.001 Hz, 可列表和步进扫描频率和幅度, 脉冲周期、脉宽和脉冲延时可调节。可提供连续波、扫描信号、模拟调制和数字调制四种基本工作模式, 与全相参体制雷达脉冲灵敏度测试相关的功能包括: (1) 支持外部提供的脉冲信号, 作为脉冲或触发输入使用; (2) 容纳 >-3 dBm 的外部时基参考输入信号电平输入, 信号源检测到存在有效的参考频率信号后, 自动从内部参考频率操作切换到外部参考频率操作; (3) 支持外部触发, 输出脉冲延迟可控功能。

测试指示器采用 RIGOL DS1102E 100M 数字脉冲示波器, 其能有效显示接收机输出的 I 路或 Q 路视频输出信号, 同时具备光标、自动测量和双通道对比等功能。

3.2.2 测试过程

基于 8257D 微波信号源^[7]和数字示波器的全相参体制雷达脉冲灵敏度测试流程及各阶段的状态判断准则如图 4 所示。主要步骤与要求如下: (1) 根据全相参雷达脉冲灵敏度测试要求连接线路, 这一过程中要注意选择接头形式、长度、适应频率范围 (如 X 波段) 合适的电缆, 并记录射频连接电缆的衰减量; (2) 安捷伦 8257D 和数字示波器加电, 此时微波信号源 8257D 界面上显示 “EXT REF”, 表示外部参考”, 按雷达接收机工作频率点设置输出频率, 输出功率设置在接收机正常工作范围, 即能够在示波器上正常判断回波的功率幅度; (3) 设置脉冲触发, 按 8257D 上软

键 “Pulse>Pulse Source>Int Triggered” 选择外触发模式; (4) 设置脉冲宽度与延时, 按软键 “Pulse Width>1.5>usec, 按 Pulse Delay>40>usec”; (5) 微波信号源输出功率保持不变, 微调 8257D 输出频率, 使示波器上回波最大, 从而保证微波信号源输出射频频率与接收机工作中心频率对准; (6) 减小信号源功率, 直到示波器回波信号与噪声电平 1:1, 此时微波信号源输出功率即为被测接收机的脉冲灵敏度。

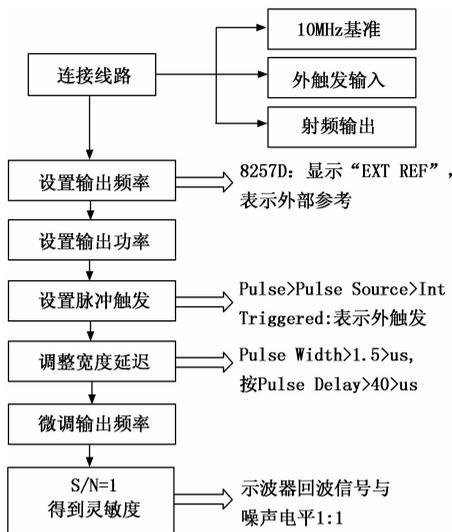


图 4 脉冲灵敏度测试流程及各阶段仪器状态

测试过程中需要注意的问题主要包括: 1) 目标回波判定, 雷达接收机工作时通常会受到外界电磁波的干扰, 如何判断示波器上显示的回波信号是由 8257D 产生的模拟回波是至关重要的问题。可采用两种方法一是只改变信号源输出信号的延迟, 回波距离主脉冲的距离随着延迟的增大而增大, 减小而减小;

雷达工作在某一频点, 按式设置 8257D 工作射频频率, 在数字示波器上观察中视频接收机输出波形如图 5 所示。



图 5 雷达工作在任意频点时 Q 路输出波形

可以看出, 示波器中显示了一个周期的信号, 且显示了两种不同幅值的信号, 一种是幅值较大的脉冲, 另一种是幅值较小的脉冲。两个等幅且幅度较大的脉冲为雷达主触发脉冲, 二者之间的时长为雷达脉冲重复周期; 中间幅度较小的脉冲应该为模拟回波信号, 但需要进一步确认。

上面提到幅值较小信号初步判定为射频回波信号, 需要通过控制变量进行验证, 当只改变信号源输出信号的延迟或功率的前提下, 对比并观察现象。

将信号的延时分别设置为 20、80 微秒, 观察现象。

从图 6 可以明显看出, 当信号的延时改变时, 回波距

离主脉冲的距离也在增大。

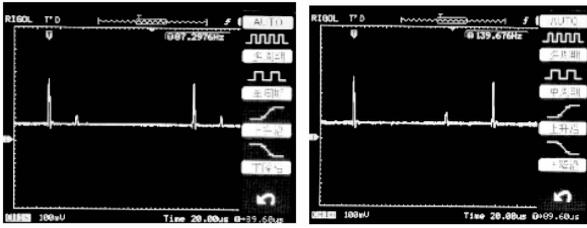


图 6 不同延时下 Q 路输出波形

另一种方法可通过改变信号源输出信号的功率，通过改变功率，观察中视频接收机输出信号幅度大小是否改变进行判断，如所示。

8257D 微波信号源输出信号频率不变，信号功率幅度分别设置为 -35、-40 dBm，观察现象。

从图 7 可以明显看出，当信号的功率改变时，回波信号的幅值是不同的，功率值越大，幅度越大。

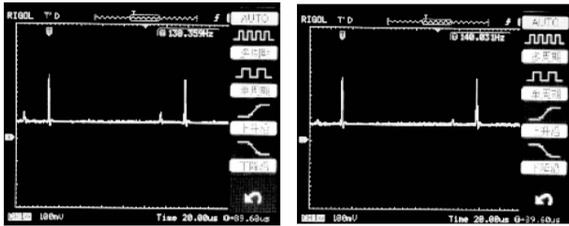


图 7 不同功率下 Q 路输出波形

通过控制两个不同的变量，观察现象，总结规律，可以得出以下结论：幅值较小的脉冲信号确实是信号源射频模拟的目标回波。

2) 测试数据处理，被测接收机输入端有一个 40 dB 的定向耦合器、同时输入射频电缆有一定的衰减，这些因素均要考虑，具体的计算公式如下：

$$S_{\min} = L_1 + L_2 + L_3 \tag{5}$$

其中： S_{\min} 为接收机脉冲信号灵敏度，单位：dBm； L_1 为信号源输出功率指示值，单位：dBm； L_2 为雷达接收机输入定向耦合器的耦合度，单位：dB； L_3 为专用测试电缆损耗单位：dB。

3.2.3 实验结果分析

雷达接收机处于正常工作状态，被测装备接收机有 32

个工作频点，选择其中五个进行测试，得到的结果见表 1。装备脉冲灵敏度战技指标为 ≤ -105 dBm，可以看出测试结果符合装备要求，表明了测试方法的有效性。

表 1 接收机灵敏度数据处理表

频点	7	11	17	19	25
L_1	-56.00	-55.00	-54.00	-53.00	-52.20
L_2	-40.27	-40.24	-40.19	-40.17	-40.12
L_3	-9.32	-10.84	-14.86	-11.53	-21.07
S_{\min}	-105.59	-106.08	-109.05	-104.70	-113.39

L_1 为信号源输出功率 (dBm)； L_2 为定向耦合器 (dB)； L_3 为射频传输电缆损耗 (dB)； S_{\min} 为灵敏度 (dBm)。

4 结论

全相参体制脉冲雷达灵敏度是新型全相参脉冲体制雷达接收机的重要指标之一，对其进行准确测试是保证接收机正常工作的重要环节。本文介绍了该指标的测试基本原理，结合某型接收机进行了测试实例分析，给出测试组成的框图、分析了测试过程和测试实施中的注意事项、判断准则以及数据处理方法。其对新型雷达接收机灵敏度测试具有较强的参考意义。

参考文献：

[1] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理 (第三版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.

[2] 马彦恒, 王志云, 等. 雷达性能测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[3] GJB 889.1-1989 雷达接收分系统测试方法灵敏度 [S].

[4] 钱玉莹, 李淑华, 叶灵伟. 雷达接收机灵敏度自动测试方案设计 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (26): 2544-2546.

[5] 和志强, 薛世建, 曾文献. 雷达接收机灵敏度虚拟测试仪 [J]. 兵工学报, 2005, 26 (2): 205-208.

[6] The Measurement and Automation Catalog [Z]. National Instrument, 2004.

[7] 安捷伦科技 E8257D/67D PSG 信号源用户指南 [Z]. National Instrument, 2005.

[8] 唐昌文, 杨江平, 徐晨曦. 雷达接收机灵敏度现场测量及工程实现 [J]. 中国测试技术, 2003, 1.

[9] 王 勇, 叶灵伟, 冯 威. 雷达接收机灵敏度自动测量的实现 [J]. 测控技术, 2007, 26 (5): 46-48.

(上接第 99 页)

[3] STM32F10x 参考手册 [Z]. RM0008 Reference Manual, 2009.

[4] 郭宗仪, 步进电动机及其控制系统. 哈尔滨: 哈工大出版社, 1983.

[5] 卓树峰. 基于 STM32 的步进电机精确控制软件设计 [J]. 九江学院学报, 2005 (5): 49-52.

[6] 孙利克. NURBS 曲线插补算法及加减速控制方法研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.

[7] 周万木. PC_based、PLC-based、独立式运动控制器、专用

数控系统 [J]. 伺服控制, 2011 (6): 21

[8] 马文斌, 杨延竹, 洪 运. 步进电机控制系统的设计及应用 [J]. 电子技术应用, 2015, 41 (11): 11-13.

[9] 徐 军, 葛素娟. 用单片机实现步进电机细分技术研究 [J]. 机床电器, 2004 (6): 25-28+39.

[10] 李艳华, 弓丹志. 微型计算机接口技术在步进电机控制中的应用 [J]. 软件世界, 2001 (1): 94-96.

[11] 32 位计数/定时器和模拟输出设备 [J]. 仪表技术, 1999 (4): 33.