

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.024

引用格式:张娅岚.单脉冲雷达天线差斜率测试技术的改进[J].电讯技术,2014,54(8):1166-1170.[ZHANG Ya-lan. Testing Technology Improvement on Antenna Slope of Difference Pattern in Monopulse Radar System[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(8):1166-1170.]

单脉冲雷达天线差斜率测试技术的改进*

张娅岚**

(中国民航飞行学院 计算机学院,四川 广汉 618307)

摘 要:针对工程应用中单脉冲雷达差斜率简便测试问题,提出了一种正弦波单脉冲差斜率测试方法。推导了将非相参的正弦波信号用于差斜率测试的公式,并将正弦波信号直接用于单脉冲给差斜率测试系统,实现对单脉冲雷达系统参数的快速校正。仿真结果表明,经过该方法校正的单脉冲雷达系统可实现优于 0.01° 的测角精度。该测试方法能够实现高精度的系统测试性能,对解决工程应用中的测试校正问题具有实际指导意义。

关键词:单脉冲雷达;天线;幅相误差;差斜率;测试校正

中图分类号:TN953 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1166-05

Testing Technology Improvement on Antenna Slope of Difference Pattern in Monopulse Radar System

ZHANG Ya-lan

(School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: In view of the expediently testing problem for the slope of difference pattern for monopulse radar system in practical project, a testing method for the monopulse slope of difference pattern based on the sine wave is presented. Formulas are derived based on the non-coherent sine wave, meanwhile the testing system for monopulse radar based on the non-coherent sine wave is introduced and the testing method can rapidly calibrate the parameter errors of monopulse radar system. Computer simulation proves that the corrected radar system can obtain the angle measurement accuracy higher than 0.01° . The method achieves higher accuracy of the testing system and it is instructive for solving test and calibration problems in monopulse radar in practical project.

Key words: monopulse radar; antenna; amplitude and phase error; slope of difference pattern; testing and calibrating

1 引 言

为了准确跟踪或击中目标,地面、机载和导弹制导雷达常采用单脉冲测角技术实现对目标坐标进行测定,这些雷达大多是相位和差式单脉冲跟踪雷达^[1]。在单脉冲测角原理中,对跟踪雷达测角精度影响较大的参数是 k_m , k_m 定义为将雷达接收的和差信号幅度比转换为目标偏离角度的斜率参数^[2-3]。

因为单脉冲天线系统的体制不同或同一体制雷达天线的加工误差原因,不同单脉冲雷达的 k_m 值是有差异的,因此需要针对每一部雷达进行系统补偿,并测量出相应的单脉冲差斜率,从而实现单脉冲雷达精确的测角功能。

目前常用的单脉冲雷达系统补偿手段有以下两种:一是试验场地定标法^[4],使用标准球让系统在

转台上旋转一周,对和、差支路的中频相移差进行标定,通过测量系统的 S 曲线,消除中频增益的不一致;二是内部补偿信号注入法^[5],产生一个中频补偿信号,分别同时加到 3 个支路的中频输入端,得到以和支路为参考的两个差支路的幅相误差系数,存储在存储器中,在信号处理过程中进行补偿。但是由于试验场地定标法不但需要选择较为开阔的场地,而且动用的设备及人员较多,花费时间也较长,有很大的局限性。而内部补偿信号注入法需要额外设计补偿信号电路,不但造成系统复杂,且受到补偿信号产生和信号处理能力的限制,目前也没有取得较好的补充效果。为了能够简便快捷地测量单脉冲雷达的差斜率,本文提出了一种利用正弦信号进行系统补偿和单脉冲差斜率测量的方法。该方法可以在较小的室内进行,且不需要开启雷达发射机,适用于采用脉冲压缩技术的相位和差式单脉冲雷达。

2 正弦波差斜率测试工作原理

信号源发射的正弦波 $s(t)$ 可由式(1)表示:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi ft) \tag{1}$$

其中, A 为信号幅度, f 为正弦波频率, t 为信号发射时间。该正弦波经过雷达的下变频,以及正交 I/Q 解调后,输出差频为 Δf 的基带信号 $s'(t)$ 如图 1 所示。

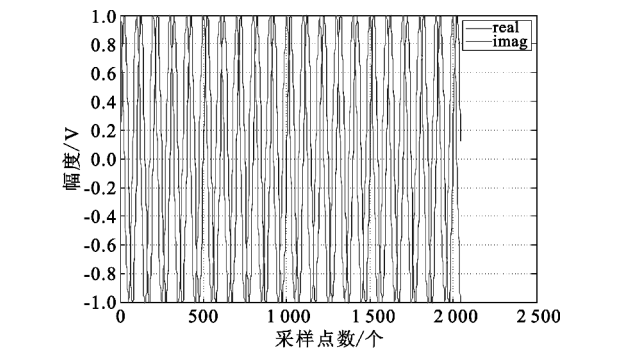


图 1 正弦波的 I/Q 信号
Fig. 1 I/Q signal of sine wave

$s'(t) = A' \exp(j2\pi\Delta ft)$ (2)

其中, A' 为正交解调后的信号幅度, Δf 为差频。最后,经信号处理进行脉冲压缩^[6],此时脉冲压缩的距离向参考函数 $H(t)$ 为

$H(t) = \exp(j\pi K_r t^2)$ (3)

其中,调频斜率 $K_r = B_r/T_p$,因此脉压处理结果可由下列过程得到:

$$|Y(t)| = \text{abs}(\text{ifft}((\text{fft}(s'(t))) \cdot \text{conj}(\text{fft}(H(t)))))) \tag{4}$$

其中, $H(f)$ 为距离向参考函数 $H(t)$ 的频谱, $\text{conj}(H(f))$ 是 $H(f)$ 信号的复共扼, $s'(f)$ 为正弦波信号 $s'(t)$ 的频谱。

假定雷达的系统带宽为 $B_r = 150 \text{ MHz}$,采样频率为 $F_r = 200 \text{ MHz}$,脉冲宽度为 $T_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$,傅里叶变换点数取 2 048。由此可得正弦波信号通过雷达脉冲压缩的输出复信号 $Y(t)$ 的 I/Q (如图 2 所示)以及输出信号的幅度波形 (如图 3 所示)。

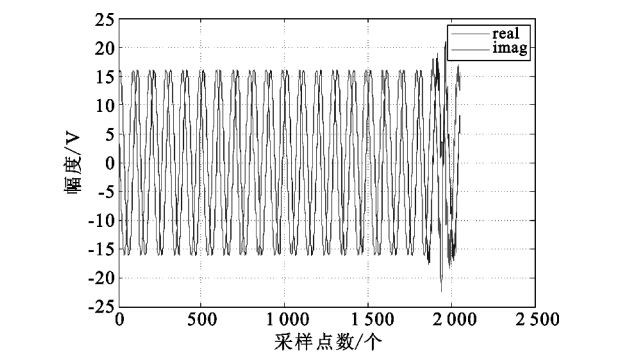


图 2 正弦信号脉压后的 I/Q 信号
Fig. 2 I/Q signal of sine wave after pulse compression

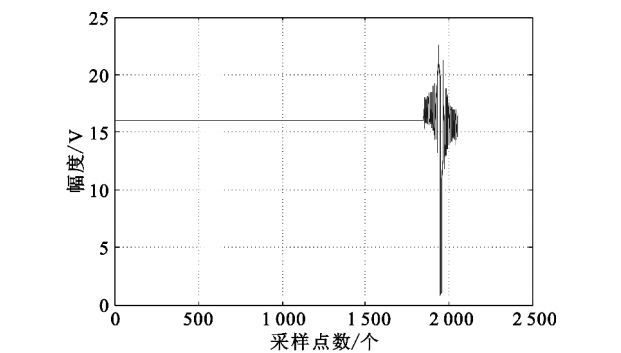


图 3 正弦信号脉压后的幅度结果
Fig. 3 Amplitude of sine wave after pulse compression

由图 2 可知,正弦波信号经过距离向参考函数进行脉冲压缩处理后,得到的输出信号依然是正弦波信号。而由于在 2 000 点附近开始接收的正弦波信号已小于 $1 \text{ }\mu\text{s}$ 的信号长度,即脉压匹配滤波器处于接收机失配状态,导致出现脉压后波形畸变,不予考虑。如图 3 所示,输出信号的幅度值 $|Y(t)|$ 在不同距离单元上是常量,根据雷达系统的信号接收原理可知, $|Y(t)|$ 应为信号源信号与天线方向图在某一方向上增益的卷积模值,其数值大小直接反映雷达天线方向图在该方向上的增益(和波束或差波束方向图)。

根据上述仿真结果,雷达系统可利用正弦波信号结合天线扫描方式,选用任意一段有效的距离单元的输出信号 $Y(t)$,得到反映雷达和波束与差波束

的天线方向图数据,从而实现对系统的补偿以及单脉冲差斜率测量。本文采用的正弦波信号与待补偿测试的雷达系统是非相参的,因此可以采用标准信号源仪器作为正弦波信号发生源,这降低了对单脉冲差斜率测试系统的要求,便于测试人员进行调试和排查雷达系统问题。

3 单脉冲差斜率测试系统工作原理

单脉冲差斜率测试系统^[7]由暗室、雷达设备、转台、喇叭天线、信号源和控制计算机等组成,如图4所示。其中,暗室为雷达设备测试提供喇叭天线向参试雷达辐射模拟信号电磁波传播的空间,同时屏蔽外界的干扰;固定架和转台为固定装置,用来保证喇叭天线与雷达之间远场距离,以及喇叭天线与雷达天线在方位和俯仰上相互对准;信号源和喇叭天线用来提供正弦波的目标模拟信号;控制计算机主要用于对雷达系统的天线扫描、时序配合、数据采集控制、数据处理和分析、结果输出等。

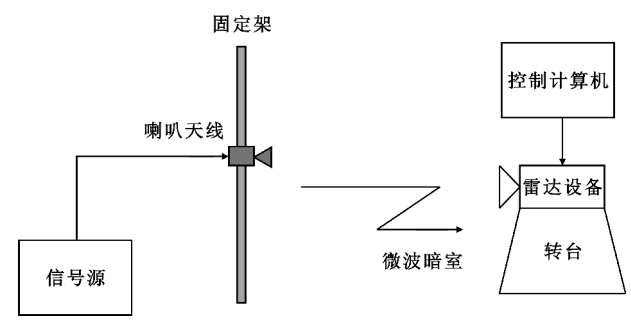


图4 单脉冲差斜率测试系统
Fig. 4 Testing system for the slope of difference pattern in monopulse radar

- 单脉冲差斜率的具体测试步骤如下:
- (1)将信号源与天线按远场条件 $R \geq K \cdot D^2/\lambda$ 架设,其中 R 为收发天线之间的距离, D 为天线口面直径, K 为取值1~2之间的系数;
 - (2)喇叭天线停在正对着雷达天线的位置,仔细调整天线角度位置(或信号源辐射天线角度位置),使和通道输出信号幅度达到最大值同时差通道输出信号幅度达到最小值。注意需调整信号源输出信号幅度,使雷达接收机工作在线性放大状态;
 - (3)控制天线按尽可能慢的速度平稳扫描,分别记录天线正向或反向扫描一帧时和/差通道接收到的信号矢量 $A_{\Sigma}e^{j\phi_{\Sigma}}$ 、 $A_{\Delta}e^{j\phi_{\Delta}}$;
 - (4)在 $\pm 2\theta_{0.5}$ 的角度范围内计算 $\arctan(A_{\Delta}/A_{\Sigma})$,同时计算对应的和差通道相位差 $\Delta\Phi = \phi_{\Sigma} - \phi_{\Delta}$;

(5)雷达单脉冲差斜率由输出的角偏差与和/差波束电压比决定,具体按式(5)计算^[8]:

$$k_m = \frac{\pi D}{\lambda k} \cdot \frac{\pi}{180} = \arctan\left(\frac{A_{\Delta}}{A_{\Sigma}}\right)/\Delta\theta \quad (5)$$

式中, k 为天线系数,与天线设计时的加权有关; D 为天线两个馈源之间的相位中心距(约为天线口径的1/2)。

实际上 $\frac{\pi D}{\lambda k} \cdot \frac{\pi}{180}$ 即为天线理论上的单脉冲差斜率^[9-10],注意 $\arctan(A_{\Delta}/A_{\Sigma})$ 的单位为rad。其中,当 $\Delta\theta$ 取值范围较小时(约在 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 时),式(5)可采用直线拟合方式得到单脉冲差斜率。

在雷达与喇叭天线正对的 0° 附近, $\Delta\Phi$ 应在 -90° 和 90° 之间突变。具体是天线 0° 哪边, $\Delta\Phi$ 为 -90° 和 90° 与天线和差器的接法有关,这决定了 $\arctan(A_{\Delta}/A_{\Sigma})$ 的符号,最终要调整到误差角度为正时, $\arctan(A_{\Delta}/A_{\Sigma})$ 为正;误差角度为负时, $\arctan(A_{\Delta}/A_{\Sigma})$ 为负。此外,也可采用计算矢量 $A = A_{\Delta}e^{j\phi_{\Delta}}/A_{\Sigma}e^{j\phi_{\Sigma}}$ 的方法来决定符号,real(A)的正负决定了 $\arctan(A_{\Delta}/A_{\Sigma})$ 的正负(当然也需进行符号验证和调整),因此要从设计上明确目标所在天线象限的正负关系。

4 仿真、试验结果及分析

假设一部采用四馈源相位和差单脉冲天线的毫米波雷达设备^[11]放置在如图4所示的单脉冲差斜率测试系统中,其理论单脉冲差斜率值为 $k_m = 0.57$ 。雷达发射频率35 GHz,方位和俯仰的波束宽度为 3.7° ,信号带宽 $B_r = 150$ MHz,脉宽 $T_p = 1 \mu s$,脉冲重复频率 $PRF = 5\,000$ Hz,雷达与喇叭天线之间的距离为8 m。设雷达天线以喇叭天线为中心,以 $100^{\circ}/s$ 的速度进行方位扫描,扫描范围为 $\pm 10^{\circ}$ 。信号发生器采用毫米波频段的信号源设备,设置频点为35.002 GHz,频偏为2 MHz,下面的仿真结果均为选取任意一相同的距离单元(这里取第8个单元)。

通过对和/差天线方向图数据进行处理后得到幅度和相位的补偿值,并将该值直接补偿到天线差方向图数据上,实现对系统和/差通道的误差补偿。其中幅度补偿值可由和差天线图的最大幅度之比与理论设计值的比较得到,相位补偿值可由和差通道相位差与理论设计值比较得到,图5为和波束/方位差波束扫描天线幅度图,该天线图由于受到系统通道幅度误差影响,和差天线图的最大幅度之比一般为6~7 dB。

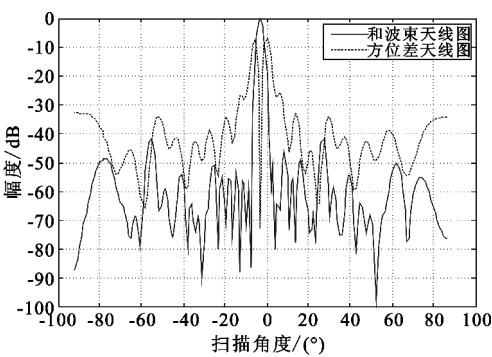


图 5 幅度校正前的天线图

Fig. 5 Antenna simulation before amplitude correction

图 6 为经幅度校正后的和波束/方位差波束扫描天线图,两者最大幅度之比为 4 dB。

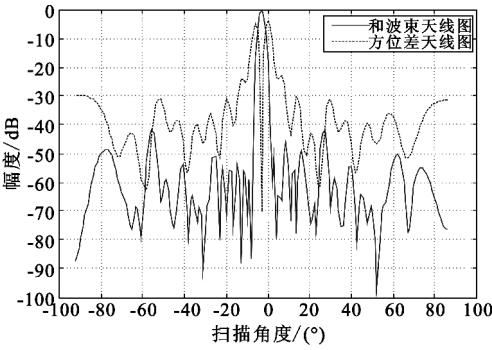


图 6 幅度校正后的天线图

Fig. 6 Antenna simulation after amplitude correction

图 7 为和波束/方位差的扫描天线相位差图 ($\Delta\Phi=\phi_{\Sigma}-\phi_{\Delta}$, 3 dB 波束宽度内), 由图 7 可知, 由于受到系统通道相位误差影响, $\Delta\Phi$ 不在理论设计值 -90° 和 90° 之间突变。图 7 中经过相位校正的和波束/方位差的扫描天线相位差图已将 $\Delta\Phi$ 补偿到在 -90° 和 90° 之间突变。

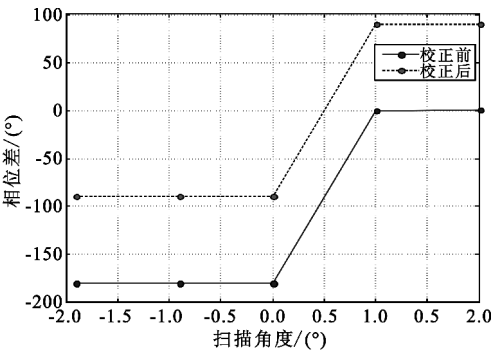


图 7 相位校正前后的和差相位误差图

Fig. 7 Sum-difference phase error before and after phase correction

图 8 为天线扫描时和差波束符号图, 即 $\text{real}(A)$ 的符号, 它表征了目标落在天线波束零轴左右位置时的正负符号值。

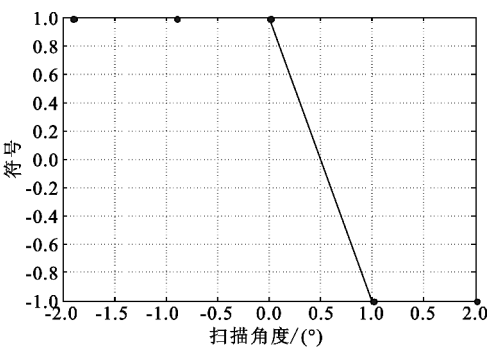


图 8 天线扫描时和差波束符号图

Fig. 8 Sum-difference wave beam while antenna scans

图 9 为采用近似直线拟合的方法得到的差斜率图, 由该图可知, 在直线拟合近似方法下得到的单脉冲差斜率为 0.49, 与理论值 0.57 相近。上述单脉冲差斜率测量都是在 $[-1.9^\circ, -1.9^\circ]$ 扫描范围内计算得到的。采用该区间能够保证和波束的幅度大于差波束的幅度, 使差斜率的测试处于线性区间。

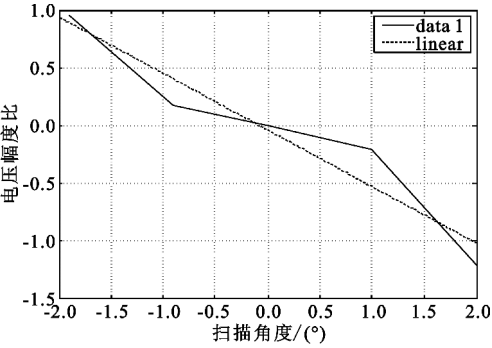


图 9 近似直线拟合的差斜率图

Fig. 9 The slope of difference pattern using linear fitting

由图 8 和图 9 可以看出, 采用本文提出的正弦波单脉冲差斜率测试方法, 可以在较为简易的测试系统中实现对雷达单脉冲跟踪系统的幅度和相位进行校正, 并且能够准确地得到雷达系统单脉冲差斜率曲线。由此可知, 该单脉冲差斜率测试方法能够实现对雷达系统单脉冲参数的快速测量和校正, 满足测试人员对雷达系统调试、设计和批量生产的需求。

本文的差斜率测量精度与雷达的接收信噪比相关。由于上述单脉冲差斜率的大小取决于差波束与和波束在零深附近的比值, 而噪声对差波束零深影响又很大, 因此一般来说, 信噪比越高, 差斜率的测量精度就越高。

从图 9 可知, 采用近似直线拟合法得到的差斜率与理论值存在一定误差, 但是该方法在单脉冲角跟踪精度要求不是非常高的条件下, 可以大大简化单脉冲跟踪的计算复杂度, 极大提高处理速度。从实际工程经验来看, 采用近似直线拟合方法得到的

差斜率,在点目标的信噪比达到20 dB时,可以实现单脉冲跟踪误差(1σ) $\leq 0.01^\circ$,该跟踪精度可以满足一般雷达系统的应用需求。在图9中,若采用直线拟合的差斜率表示为 k_m ,采用式(5)的差斜率表示为 k'_m ,在 $\pm 1^\circ$ 范围内统计两者的误差均值为0.22,在 $\pm 0.5^\circ$ 范围内统计两者的误差均值为0.04。如果雷达系统跟踪精度要求非常高,也可利用式(5)的方法,差斜率采用查表法或分段拟合直线法替代常数 k_m ,从而更好地逼近单脉冲差斜率曲线,提高单脉冲的测角精度。

5 结 论

本文提出了一种正弦波单脉冲差斜率测试方法,并根据该方法构建了一套简易单脉冲差斜率测试系统。该系统将非相参的正弦波应用于单脉冲雷达的差斜率测试,可以快速地在幅度和相位上获得补偿参数,并同时得到补偿后的单脉冲差斜率曲线。由仿真结果可知,经测试方法补偿的雷达系统其测角精度可实现 0.01° ,满足航空航天跟踪测量雷达需要,具有系统构建简单、测试精度高的优点,能够较好地满足单脉冲雷达跟踪所需要的系统幅相补偿和差斜率参数测量要求。本文从测试系统角度解决了单脉冲雷达幅相补偿和差斜率测量问题,在单脉冲跟踪雷达的系统设计、测试和批量生产应用中具有一定的工程意义。

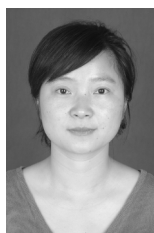
参考文献:

- [1] 向敬成,张明友. 雷达系统[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
XIANG Jing-cheng, ZHANG Ming-you. Radar Systems [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [2] 毛祺. 相位和差单脉冲雷达仿真研究[D]. 成都:电子科技大学,2008:4-12.
MAO Qi. Research on Sum-Difference Phase-Comparison Mono-Pulse Radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008:4-12. (in Chinese)
- [3] 高梅国,周闰. 和差数字鉴相分析[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(1):28-29.
GAO Mei-guo, ZHOU Run. Analysis of Digital Phase Detector Between Sum and Difference Signals[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(1):28-29. (in Chinese)
- [4] 胡体玲,李兴国. 单脉冲探测技术的发展综述[J]. 现代雷达,2006,28(12):24-29.
HU Ti-ling, LI Xing-guo. Research on Development of Monopulse Detection Technology [J]. Modern Radar,

2006,28(12):24-29. (in Chinese)

- [5] 刘养林,董胜波,梅光宗,等. 毫米波单脉冲测角中幅相不一致的影响及补偿[J]. 宇航计测技术,2011,31(1):25-31.
LIU Yang-lin, DONG Sheng-bo, MEI Guang-zong, et al. Effect and Compensation of Amplitude and Phase Inconsistency in MMW Mono-pulse Angle Measurement [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2011,31(1):25-31. (in Chinese)
- [6] Richards M A. 雷达信号处理基础[M]. 刑孟道,王彤,李真芳,等,译. 北京:电子工业出版社,2008:20-46.
Richards M A. Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. Translated by XING Meng-dao, WANG Tong, LI Zhen-fang, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:20-46. (in Chinese)
- [7] 张光义. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,1994.
ZHANG Guang-yi. Phased Array Radar Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994. (in Chinese)
- [8] 陈伯孝,张守宏. 单脉冲三维成像及其在末制导雷达中的应用[J]. 雷达科学与技术,2003(4):205-209.
CHEN Bo-xiao, ZHANG Shou-hong. Mono-pulse Radar 3-D Imaging and Its Application in Terminal Guidance Radar[J]. Radar Science and Technology, 2003(4):205-209. (in Chinese)
- [9] 王德纯,丁家会. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006:64-85.
WANG De-chun, DING Jia-hui. Precision Tracking and Instrumentation Radar Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2006:64-85. (in Chinese)
- [10] 马振球,崔嵬. 相位和差单脉冲雷达测角性能分析[J]. 北京理工大学学报,2009,29(8):726-731.
MA Zhen-qiu, CUI Wei. Angle Measurement Performance Analysis of Sum-Difference Phase-Comparison Mono-Pulse Radar[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009,29(8):726-731. (in Chinese)
- [11] 鞠智芹,董胜波,钟全华. 比幅和差式单脉冲雷达微波和差器建模[J]. 计算机仿真,2004,21(9):7-9.
JU Zhi-qin, DONG Sheng-bo, ZHONG Quan-hua. Model for Microwave Sum and Difference Network of Monopulse Radar with Amplitude-comparison [J]. Computer Simulation,2004,21(9):7-9. (in Chinese)

作者简介:



张娅岚(1983—),女,四川成都人,2007年获硕士学位,现为中国民航飞行学院讲师,长期从事信号处理相关教学及研究。

ZHANG Ya-lan was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1983. She received the M. S. degree in 2007. She is now a lecturer. She is engaged in teaching and research on signal

processing.

Email:zealous21@126.com