文章编号:1674-2974(2024)06-0204-07 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024240

斜极化雷达辐射发射指标测量与计算方法研究

李建轩[1†],金祖升[1],张磊[2],张晓[2],张波[1],陈锐[1]
(1. 海军研究院, 北京 100161;
2. 海军工程大学 电磁能技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要:本文提出了一种斜极化雷达辐射发射指标的测量与计算方法.采用接收天线正交的两次组合测量,可快速测量与计算得到任意未知角度斜极化雷达各频点的信号真实幅值,进而计算得到斜极化雷达的谐波和乱真抑制度.分别采用接收天线一组X轴对称角度和0°三个极化方向的三次频域组合测量可快速测量与计算得到任意斜极化雷达每个频点的准确极化角度.提出的测量与计算方法可有效避免目前国军标中雷达辐射发射指标测量方法针对斜极化雷达时的不足,且测量效率高,误差小,试验结果证明了提出方法的正确性和准确性.

关键词:斜极化雷达;辐射发射指标;极化角度;测量与计算
中图分类号:TM933.13 **文献标志码**:A

Research on Measurement and Calculation Method of Radiative Emission Index of Oblique Polarization Radar

LI Jianxuan[1†], JIN Zusheng[1], ZHANG Lei[2], ZHANG Xiao[2], ZHANG Bo[1], CHEN Rui[1]
(1. Naval Research Institute, Beijing 100161, China;
2. National Key Laboratory of Electromagnetic Energy Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A method for measuring and calculating the radiation emission index of linear oblique polarization radar is proposed in this paper. The actual amplitude of each frequency of the oblique polarization radar at any unknown angle can be quickly measured and calculated by using a single combination of the receiving antenna orthogonal measurement, and then the harmonic and spurious suppression degree of the oblique polarization radar can be calculated. The accurate polarization angle of each frequency point of an arbitrary oblique polarization radar can be quickly measured and calculated with the three frequency-domain combined measurement results of a set of X-axis symmetric angles and three polarization directions of 0 degrees. The proposed measurement and calculation method can effectively avoid the shortcomings of the current radar radiation emission measurement method for the oblique polarization radar. The measurement efficiency is high and the error is small. The test results prove the correctness and accuracy of the proposed method.

Key words: oblique polarization radar; radiative emission index; polarization angle; measuremen and calculation

* **收稿日期**:2023-07-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(92166205), National Natural Science Foundation of China(92166205)
作者简介:李建轩(1980—),男,河南洛阳人,海军研究院高级工程师,博士
† 通信联系人,E-mail:ljx0500507@163.com

大功率雷达作为系统或平台的远距离大范围预警探测设备,其工作过程中产生的高峰值功率、小占空比的强脉冲场是影响系统或平台自身电磁环境复杂性和电磁安全性的首要因素,因此对其辐射发射指标进行测量与计算意义重大.现代大功率雷达辐射发射指标主要包括基波峰值场强、谐波和乱真抑制度、极化角度等参数,这些参数也是对雷达实施电子对抗的重要输入[1-3].

雷达上述指标参数的快速准确测量与计算引起了各国研究者们的高度重视,国内外电磁兼容领域核心标准均针对雷达辐射发射指标提出了考核要求和测量方法,传统测量方法主要包括以下三个步骤:1)天线对准;2)采用式(1)进行有效辐射功率(Effective Radiated Power, ERP)校验,误差必须在3 dB以内;3)进行基波峰值场强、谐波和乱真抑制度等指标测量与计算[4-5].上述测量过程的第一步和第二步实际是天线对准的要求与检验方法,如果不能实现对准,后续得到的测量与计算指标均为错误结果.

$$\mathrm{ERP} = V + 20\lg R + \mathrm{AF} + \mathrm{AC} - 135 \tag{1}$$

式中:R为接收天线与发射机天线实际距离(单位:m),AF为接收天线系数(单位dB),AC为测量路径衰减[单位dB(1/m)],V为测量接收机读数(单位:dBμV).

目前常规雷达的极化方式为水平极化(极化角度0°)或垂直极化(极化角度90°),针对传统的雷达极化方式,测量时只要调整接收天线水平和垂直极化就可以实现天线快速对准,依据测量结果可以计算得到雷达辐射发射指标,可见目前的标准方法仅适用于极化角度比较简单的水平或垂直极化雷达.随着雷达抗干扰和电子对抗等要求的提高,新型斜极化雷达逐步得到广泛应用,斜极化雷达极化角度在$-90°<\theta\leqslant 90°$范围连续可调,采用当前常用的测试方法基本不可能实现精确对准,且常规测量接收天线物理结构上仅标记30°、45°等少数几个典型极化角度,即使知道斜极化角度也无法准确布置接收天线的位置,实现任意角度准确对准.

同时传统测量方法是基于雷达极化角度非0°即为90°的情况,也是通过尝试方法判定极化角度为0°还是90°,针对斜极化雷达,因频域接收机测量结果不包含相位信息,传统方法无法获取斜极化雷达的准确极化角度,故无法实施有效的电子干扰与对抗.基于上述分析,新的斜极化雷达辐射发射指标测量与计算成为对其电磁兼容性能指标评估和实施电子对抗与干扰防护的难点技术.

1　斜极化雷达幅频特性测量与计算

针对斜极化雷达辐射发射指标测量与计算评估难题,当前国内外普遍的做法是接收天线采用水平或垂直极化方法进行一次测量,依据该选定的极化方向测量结果得到的基波、谐波及乱真信号幅值进行抑制度计算,该方法无法得到斜极化雷达真实准确的基波峰值场强、谐波和乱真抑制度、极化角度等指标信息,只能得到谐波和乱真相对抑制度,且上述得到的抑制度指标准确的前提是基波、谐波和乱真等每个频率点极化角度完全一致,实际装备不一定满足.此外采用标准的接收天线一次水平或垂直极化测量,如采用一次水平极化方法,如果雷达发射天线极化角度接近90°的情况,根据正交分解可知,测量得到的水平方向基波、谐波和乱真信号幅值均较小,谐波和乱真可能淹没在测量接收机的背景噪声中,无法得到斜极化雷达的真实性能指标,即接收天线水平极化的方法要求斜极化雷达极化角度不能太大,接收天线垂直极化的方法要求斜极化雷达极化角度不能太小,针对斜极化角度未知的情况更难科学选择.

基于信号正交分解理论可知,可采用接收天线正交的两次组合测量(典型为接收天线水平极化和垂直极化两次组合频域测量),基波峰值场强和乱真抑制度正交两次组合测量法如图1所示,可快速计算得到每个频率点的准确场强值,进而可计算得到每个频率点谐波和乱真抑制度.

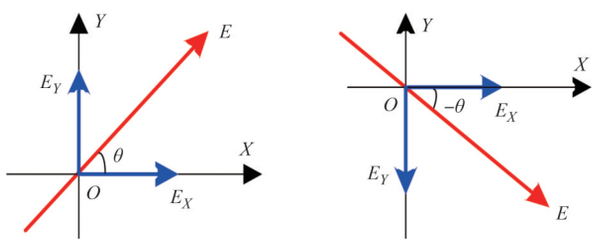


图1　正交两次组合测量法

Fig.1　Orthogonal double combination measurement method

1.1　斜极化雷达幅频特性正交测量法

假设雷达斜极化角度为θ或$-\theta$,如图1所示,接收天线水平极化脉冲场强测量结果函数表达式记为E_X,实际是斜极化场强(包含基波、谐波及带外乱真)在X轴上的投影;接收天线垂直极化脉冲场强测量结果函数表达式记为E_Y,实际是斜极化场强(包含基

波、谐波及带外乱真)在Y轴的投影,测量结果函数表达式如式(2)和式(3)所示,但测量接收机结果实际显示的是$|E_X(f_0)|$、$|E_X(f_n)|$、$|E_Y(f_0)|$、$|E_Y(f_n)|$等的模值[6-8].

$$E_X \approx E_X(f_0)\cos[2\pi f_0 t+\phi(f_0)]+\sum_{n=2f_0}^{Mf_0}E_X(f_n)\cos[2\pi f_n t+\phi(f_n)]+\sum_{n=f_{N1}}^{f_{N2}}E_X(f_n)\cos[2\pi f_n t+\phi(f_n)] \tag{2}$$

$$E_Y \approx E_Y(f_0)\cos[2\pi f_0 t+\phi(f_0)]+\sum_{n=2f_0}^{Mf_0}E_Y(f_n)\cos[2\pi f_n t+\phi(f_n)]+\sum_{n=f_{N1}}^{f_{N2}}E_Y(f_n)\cos[2\pi f_n t+\phi(f_n)] \tag{3}$$

式中:E_X和E_Y分别为接收天线水平极化和垂直极化的脉冲场强测量结果函数(实际测量只需正交即可),$E_X(f_0)$和$E_Y(f_0)$分别为接收天线水平和垂直极化基波频率点的场强值,$E_X(f_n)$和$E_Y(f_n)$分别为接收天线水平和垂直极化频率点f_n的场强值,M为测量频率范围内谐波数量,f_{N1}为乱真起始频率,f_{N2}为乱真截止频率(不含谐波频率).

依据频域测量接收机工作原理,测量结果为被测信号的模值,不包含相位信息,因此依据图1可以看出,斜极化雷达无论一、三象限还是二、四象限,斜极化测量结果均不受影响,测量结果均为斜极化雷达在X轴和Y轴方向上的投影绝对值,其中基波、各次谐波和特定频率点乱真幅值分别按照公式$|E|=\sqrt{|E_X^2|+|E_Y^2|}$计算得到,如基波频率、谐波和乱真某频率幅值计算如式(4)和式(5)所示.

$$|E(f_0)|=\sqrt{|E_X^2(f_0)|+|E_Y^2(f_0)|} \tag{4}$$

$$|E(f_n)|=\sqrt{|E_X^2(f_n)|+|E_Y^2(f_n)|} \tag{5}$$

式中:$|E(f_0)|$为基波f_0频率点处场强计算值,$|E_X(f_0)|$和$|E_Y(f_0)|$分别为天线水平和垂直极化基波频率点的场强测量值,$|E(f_n)|$为频率点f_n处场强计算值,$|E_X(f_n)|$和$|E_Y(f_n)|$分别为天线水平和垂直极化频率点f_n的场强测量值.

1.2 斜极化雷达谐波和乱真抑制度测量与计算

对斜极化雷达,采用一次正交组合的测量法、一次正交组合测量法最简单的为接收天线水平极化和垂直极化,依据一次正交测量结果和式(4)、式(5)分别计算出每个测量频率点的信号幅值,谐波和乱真抑制度按照式(6)计算得到:

$$|E(f_0)|-|E(f_n)|=\sqrt{|E_X^2(f_0)|+|E_Y^2(f_0)|}-\sqrt{|E_X^2(f_n)|+|E_Y^2(f_n)|} \tag{6}$$

式中:$|E(f_0)|$为基波f_0频率点处场强计算值,$|E_X(f_0)|$和$|E_Y(f_0)|$分别为天线水平和垂直极化基波频率点的场强测量值,$|E(f_n)|$为频率点f_n处场强计算值,$|E_X(f_n)|$和$|E_Y(f_n)|$分别为天线水平和垂直极化频率点f_n的场强测量值.式(6)中单位为线性值,计算时经常用dB单位,使用时应进行单位转换.

2 斜极化雷达极化角度三次测量法

针对新体制斜极化雷达,准确得到极化角度,是雷达干扰防护和对雷达实施电子对抗的前提,但常规的电磁兼容频域测量不包含相位信息,为此本文提出采用接收天线一组X轴对称角度和0°三个极化方向的三次频域组合测量来快速计算雷达斜极化角度的方法[9-12].

假设雷达斜极化信号为E,斜极化方向与X轴夹角记为θ,雷达线极化为一、三象限或者二、四象限,因此$-90°<\theta\leqslant 90°$.通过理论推导出接收天线分别采用45°、0°、-45°三个方向的三次频域测量值计算得到雷达斜极化角度的方法,要特别说明的是不限于45°和-45°,两个角度以X轴对称即可.其中接收天线45°、0°、-45°三个方向的信号测量值函数表达式分别记为E_1、E_0、E_2,三次测量原理示意图如图2所示.

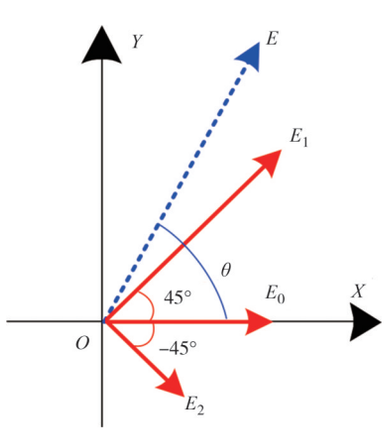


图2 极化角度三次测量方法

Fig.2 Polarization angle three times measurement method

根据矢量分解可以得到:

$$E=\frac{E_0}{\cos\theta}=\frac{E_1}{\left|\cos(\theta-45^\circ)\right|}=\frac{E_2}{\left|\cos(\theta+45^\circ)\right|} \tag{7}$$

式中:E_0为接收天线水平极化测量结果函数,E_1为接收天线45°极化测量结果函数,E_2为接收天线-45°极化测量结果函数.

假设雷达斜极化角在第一和第三象限,即$0^\circ<\theta\leqslant 90^\circ$,可以得到:

$$E_1=E\cdot\left|\cos(\theta-45^\circ)\right|=E\cdot\left|\cos\theta\cos45^\circ+\sin\theta\sin45^\circ\right|=E\cos\theta\cos45^\circ\left(1+\tan\theta\tan45^\circ\right) \tag{8}$$

$$E_2=E\cdot\left|\cos(\theta+45^\circ)\right|=E\cdot\left|\cos\theta\cos45^\circ-\sin\theta\sin45^\circ\right|=E\cos\theta\cos45^\circ\left(1-\tan\theta\tan45^\circ\right)=\begin{cases}E\cos\theta\cos45^\circ\left(1-\tan\theta\tan45^\circ\right),0^\circ\leqslant\theta<45^\circ\\E\cos\theta\cos45^\circ\left(\tan\theta\tan45^\circ-1\right),45^\circ\leqslant\theta\leqslant90^\circ\end{cases} \tag{9}$$

$$E_1-E_2=\begin{Bmatrix}E\cos\theta\cos45^\circ\times2\tan\theta\tan45^\circ,0^\circ\leqslant\theta\leqslant45^\circ\\E\cos\theta\cos45^\circ\times2,45^\circ\leqslant\theta\leqslant90^\circ\end{Bmatrix}\geqslant0=\begin{Bmatrix}\sqrt{2}E\cos\theta,0^\circ\leqslant\theta\leqslant45^\circ\\\sqrt{2}E\sin\theta,45^\circ\leqslant\theta\leqslant90^\circ\end{Bmatrix}\geqslant0 \tag{10}$$

依此类推,假设雷达斜极化角在第二四象限,即$-90^\circ<\theta\leqslant0^\circ$,可以得到:

$$E_1-E_2\leqslant0 \tag{11}$$

依据上述计算结论,如果两个45°角测量结果$E_1>E_2$,则雷达斜极化角$\theta>0$,对应的矢量关系如图2所示,依据式(7)和式(10)可计算得到极化角度计算公式(12).

$$\theta=\left|\arctan\frac{E_1-E_0\cos45^\circ}{E_0\sin45^\circ}\right|=\left|\arctan\frac{E_2-E_0\cos45^\circ}{E_0\sin45^\circ}\right|=\left|\arctan\frac{(E_1-E_2)\cot45^\circ}{E_1+E_2}\right| \tag{12}$$

如果知道$\theta>0$或$\theta<0$,也可以直接采用$\left|E_Y(f_n)\right|$和$\left|E_X(f_n)\right|$计算得到基波、谐波和乱真频率点的极化角度θ_{f_n}如下:

当θ>0°时:

$$\theta_{f_n}=\left|\arctan\frac{E_Y(f_n)}{E_X(f_n)}\right| \tag{13}$$

当θ<0°时:

$$\theta_{f_n}=-\left|\arctan\frac{E_Y(f_n)}{E_X(f_n)}\right| \tag{14}$$

式中:θ_{f_n}为频率点f_n处的极化角度.

实际测量过程中,测量得到的E_1、E_0、E_2是包含基波、谐波和乱振等各频率点的幅频特性曲线,不同频率点的极化角度应分别采用不同频率点的幅值进行计算,且不同频率点的计算结果不一定相同.在实际装备中,斜极化雷达主要关注的是基波的斜极化角度,θ_{f_0}(基波极化角度)应采用E_1、E_0、E_2中的基波分量幅值来进行计算.

3　试验验证

3.1　谐波和乱真抑制度测量验证

针对某斜极化雷达,为验证方法的正确性和准确性,调节其极化角度为已知的45°,接收天线水平极化与垂直极化测量结果分别如图3和图4所示.根据图3和图4的测量结果,并采用式(4)和式(5)可快速计算得到斜极化雷达基波、谐波和乱真等各频率点的幅值.

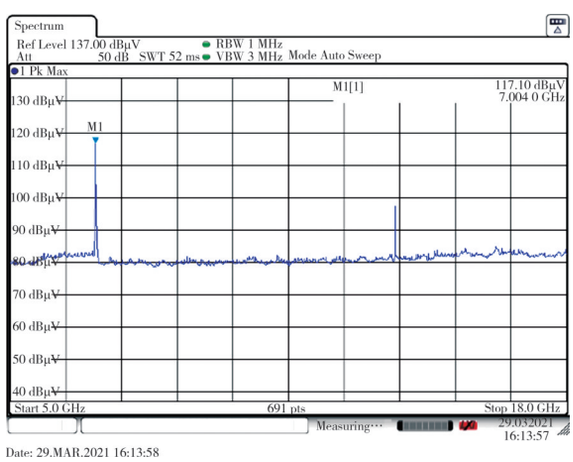


图3　接收天线水平极化测量结果

Fig.3　Receiving antenna horizontal polarization measurement results

$$E(f_0)=\sqrt{\left|E_X^2(f_0)\right|+\left|E_Y^2(f_0)\right|}=(\sqrt{0.707\,9^2+0.615\,9^2}+120)\,\text{dBµV}=119.45\,\text{dBµV} \tag{15}$$

$$E(f_2)=\sqrt{\left|E_X^2(f_2)\right|+\left|E_Y^2(f_2)\right|}=(\sqrt{0.005\,47^2+0.004\,47^2}+120)\,\text{dBµ}C=99.97\,\text{dBµV} \tag{16}$$

根据公式(6)分别计算得出谐波和乱真抑制度,

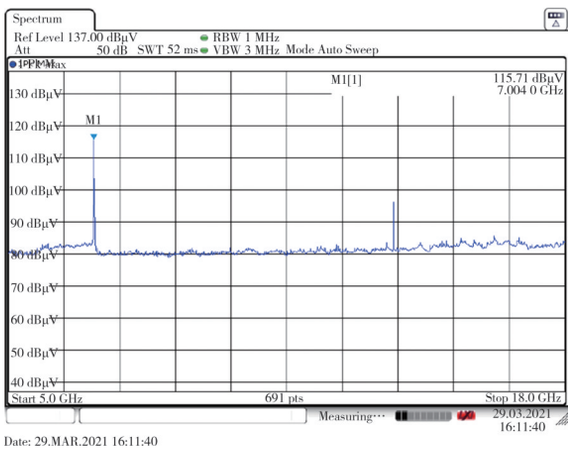


图 4 接收天线垂直极化测量结果

Fig.4 Receiving antenna vertical polarization measurement results

试验结果中仅测量到二次谐波,其他频点计算方法相同类推,各种情况下测量与计算结果详细对比见表 1.通过表 1 可以看出斜极化雷达基波峰值和其他各频点真实信号幅值必须通过一次正交组合测量结果进行合成计算得到,合成后的基波、谐波幅值与接收天线 45°斜极化方法实际测量结果误差分别为 0.09 dB 和 0.66 dB,在不考虑测量对准等影响因素的情况下误差也在 1.0 dB 以内;反之如果仅采用一种传统的接收天线水平极化或垂直极化误差最小也高达 1.93 dB.对于抑制度,合成后的结果与实际 45°极化测量结果误差为 0.75 dB,与采用水平极化的测量与计算结果基本一致,但远小于采用垂直极化的测量结果的抑制度 2.95 dB.因此可以看出,采用一次正交组合测量与计算方法,可以大大提高准确性,且布置方便,操作实施简单.

$$\left|E(f_0)\right| - \left|E(f_2)\right| = \sqrt{\left|E_X^2(f_0)\right| + \left|E_Y^2(f_0)\right|} - \sqrt{\left|E_X^2(f_2)\right| + \left|E_Y^2(f_2)\right|} \tag{17}$$

表 1 测量与计算结果对比表

Tab.1 Comparison table of measurement and calculation results

结果类型	基波幅值/dBµV	二次谐波幅值/dBµV	抑制度/dB	基波峰值偏差/dB	二次谐波值偏差/dB	抑制度偏差/dB
水平极化测量结果	117.01	97.38	19.63	2.53	1.93	0.60
垂直极化测量结果	115.79	96.51	19.28	3.75	2.80	2.95
45°斜极化计算结果	119.45	99.97	19.48	0.09	0.66	0.75
45°斜极化测量结果	119.54	99.31	20.23	—	—	—

注:基波、二次谐波、抑制度偏差均以 45°极化实测值为参考基准比较.

3.2 极化角度测量验证

针对斜极化雷达极化角度测量与计算方法验证,采用在实验室模拟方式进行.采用信号源脉冲调制模拟雷达信号输出至发射天线,发射天线 45°斜极化,接收天线分别采用水平极化、垂直极化、45°斜极化及-45°斜极化方式进行 4 次测量,测量结果分别如图 5~图 8 所示,其中垂直极化方式测量是为了补充验证,实际计算中可省略.

依据本文提出的三次测量方法,并根据式(10)可知如果 $E_1 \geqslant E_2$,则可以计算得出斜极化角度为 $0^\circ < \theta \leqslant 90^\circ$.在实验室模拟案例中 E_1 的基波测量值为 -24.23 dBm,E_2 的基波测量值为-51.70 dBm,显然 $E_1 \geqslant E_2$,因此可得出发射天线极化角度为 $0^\circ < \theta \leqslant 90^\circ$.在得出发射天线极化角度为 $0^\circ < \theta \leqslant 90^\circ$ 的基础上,为简化计算根据图 5 水平极化和图 6 垂直极化测量结果,并依据式(13)可以计算得到基波、谐波及乱真各频率点的极化角度.基波极化角度计算如式(18),约为 43°,与实际模拟系统 45°极化角度基本一致,偏差原因是天线场地布置影响,没有进行严格对准和角度校准,其他频率点计算方法相同,验证了方法的正确性.且通过试验验证过程可以看出,如果知道水平极化和垂直极化测量结果,推荐优先选用式(13)或式(14)进行极化角度计算.



图 5 接收天线水平极化测量结果

Fig.5 Receiving antenna horizontal polarization measurement results



图 6　接收天线垂直极化测量结果

Fig.6　Receiving antenna vertical polarization measurement results

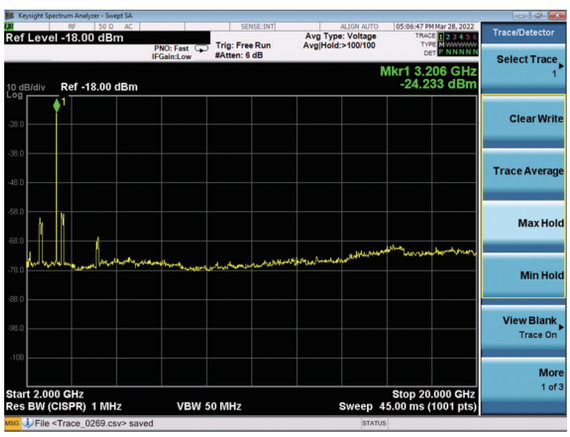


图 7　接收天线 45°斜极化测量结果

Fig.7　Receiving antenna 45° oblique polarization measurement results

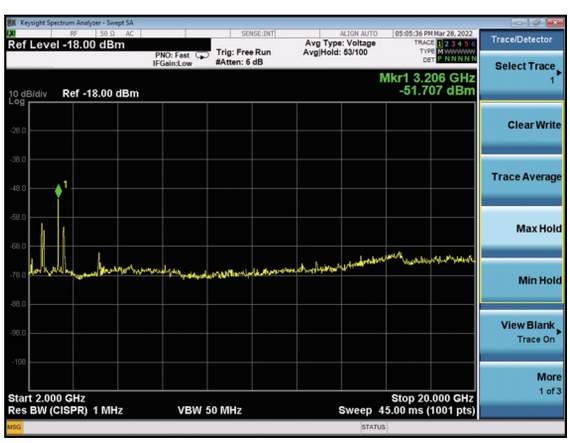


图 8　接收天线-45°斜极化测量结果

Fig.8　Receiving antenna −45° oblique polarization measurement results

$$\theta_0 = \left| \arctan \frac{E_Y(f_0)}{E_X(f_0)} \right| = 43^\circ \qquad (18)$$

4　结 论

基于目前国军标中雷达辐射发射指标传统测量方法针对斜极化雷达时的不足,并结合信号理论计算分析,本文提出了一种任意未知角度斜极化雷达辐射发射指标的测量与计算方法,可以得到以下结论:

1)提出采用接收天线正交的两次组合频域测量,可快速合成计算得到任意未知角度斜极化雷达每个频率点的真实信号幅值,进而可快速计算得到每个频率点准确的谐波和乱真抑制度,提出的试验方法布置简单,便于操作且误差更小,试验结果证明了提出方法的正确性和准确性.

2)提出采用接收天线一组 X 轴对称角度和 0^0 三个极化方向的三次不包含相位信息的频域测量结果,可快速计算得出任意斜极化雷达每个频点的准确极化角度,为精准电子对抗和斜极化雷达指标测量评估提供输入,剔除试验布置等因素影响,误差小,效率高,实验结果证明了提出方法的正确性和准确性.

3)提出的测量与计算方法可有效避免目前国军标中雷达辐射发射性能指标测量方法应用于斜极化雷达时的不足,拓展方法的应用范围,且具有误差小,效率高的特点.

参考文献

[1]　闫民华,刘国强,杨杰,等. S波段高功率微波对短波通信电台的损伤效应试验研究[J]. 防护工程,2019,41(2):19-23.
YAN M H, LIU G Q, YANG J, et al. Experimental research on damage effect of S-band high power microwave on shortwave communication equipment [J]. Protective Engineering, 2019, 41(2):19-23.(in Chinese)

[2]　乔登江. 高功率电磁脉冲、强电磁效应、电磁兼容、电磁易损性及评估概论[J]. 现代应用物理,2013,4(3):219-224.
QIAO D J. Introduction to HPEMP, IEME, EMC, and EM susceptibility and its assessments[J]. Modern Applied Physics, 2013, 4(3):219-224.(in Chinese)

[3]　周璧华, 石立华, 王建宝 ,等. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社,2019.
ZHOU B H, SHI L H, WANG J B, et al. Electromagnetic pulse

and its engineering protection[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press,2019.(in Chinese)

[4] 国防科学技术工业委员会. GJB 151A—97军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. 北京:中国标准出版社, 1997.
National Defense Science and Technology Committee. Electromagnetic emission and susceptibility requirements for military equipment and subsystems GJB 151A—97 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.(in Chinese)

[5] 国防科学技术工业委员会. GJB 152A—97军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
National Defense Science and Technology Committee. Measurement of electromagnetic emission and susceptibility for military equipment and subsystems GJB 152A—97[S]. Beijing: Standards Press of China,1997.(in Chinese)

[6] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2000.
ZHENG J L, YING Q H, YANG W L. Signals and systems[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2000.(in Chinese)

[7] 同济大学数学教研室. 高等数学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 1996.
Mathematics teaching and reasearch room of Tongji University. Higher mathematics [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 1996.(in Chinese)

[8] 周忠元,陈贝贝. 脉冲调制辐射场的场强测量[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(6):1186-1191.
ZHOU Z Y, CHEN B B. Measurement of pulse-modulated radiation field strength [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46 (6): 1186-1191.(in Chinese)

[9] 孟进,张磊,赵治华,等. 新型舰船系统电磁干扰分析、测量与防护[M]. 北京:电子工业出版社, 2020.
MENG J, ZHANG L, ZHAO Z H, et al. Analysis, measurement and protection of electromagnetic interference of new ship system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.(in Chinese)

[10] 张向明,李建轩,赵治华,等. 基于时-频变换的电磁干扰频谱测试方法[J]. 电工技术学报,2015,30(S2):16-20.
ZHANG X M, LI J X, ZHAO Z H, et al. Test method of electromagnetic interference spectrum based on time-frequency transformation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(S2):16-20.(in Chinese)

[11] 马伟明,肖飞,聂世雄. 电磁发射系统中电力电子技术的应用与发展[J]. 电工技术学报,2016,31(19):1-10.
MA W M, XIAO F, NIE S X. Applications and development of power electronics in electromagnetic launch system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 1-10.(in Chinese)

[12] 张向明, 赵治华, 孟进, 等. 大功率电磁装置短时变频磁场辐射测试系统[J]. 电工技术学报,2010,25(9):8-13.
ZHANG X M, ZHAO Z H, MENG J, et al. Measurement system for short-time and frequency-conversion magnetic field radiated by high-power electromagnetic equipment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(9):8-13.(in Chinese)