一种基于微波暗室的大角域卫星导航接收机测试场景构建方法

郭淑霞,张 宁,袁春娟

(西北工业大学 无人机特种技术重点实验室,陕西 西安 710065)

摘 要: 提出了一种基于微波暗室的大角域测试场景构建方法,该方法利用已有 42°射频面阵,采用多状态联合校准方法对面阵天线单元到接收机的信号幅度和相位进行校准,以及采用灰色关联分析方法将外界环境下的卫星星座、动态干扰在微波暗室内实现逼真映射,构造最大视场角为 160°的半实物抗干扰测试场景。仿真测试结果表明:暗室天线单元与实际场景下的卫星星座在角域关系下最大误差在高增益 3 dB 波束宽度内,暗室模拟的动态干扰与实际环境下到达接收机的功率基本一致;最后实现了对多波束抗干扰接收机的测试,并通过干信比与有效载噪比的关系曲线说明了该方法能够在室内实现导航接收机测试环境的逼近模拟,并准确地测试出多波束接收机的抗干扰性能。

关键词: 卫星导航接收机; 大角域; 多状态联合校准; 灰色关联分析; 场景映射

中图分类号: TN965.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2986-06

Construction method of wide angle test scenario for satellite navigation receiver based on anechoic chamber

Guo Shuxia, Zhang Ning, Yuan Chunjuan

(Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710065, China)

Abstract: A construction method of wide angle test scenario based on the anechoic chamber was proposed. Utilizing the existing 42° RF array, the amplitude and phase of signals arriving at the receiver from array antenna units were calibrated by multi-state joint calibration. And by gray relational analysis principles, the proposed method achieved the approximately true mapping satellite constellation and dynamic interference in the anechoic chamber. So the semi-physical anti-jamming test environment whose largest field angle was 160° was constructed. Simulation and test results show that the maximal deviation between antenna units in the anechoic chamber and the angular domain of the satellite constellations in the real scene is within high gain 3 dB beam width, and the power needed for dynamic interference to arrive at the receiver is approximately the same whether at actual scene or under simulation in anechoic chamber. Lastly, the anti-jamming test of multi-beam receiver was completed, the relation curves of J/S and C/N_0 were given, indicating that the proposed method can not only effectively simulate the outfield test scenario of satellite navigation receiver indoors, but also accurately test the performance of multi-

收稿日期: 2014-01-15; **修订日期:** 2014-02-18

基金项目: 某部级基金(20212HK03010);2010 年西北工业大学科技创新基金(2010KJ0140)

作者简介: 郭淑霞(1965-),女,副教授,硕士生导师,博士,主要从事卫星导航、复杂电磁环境模拟方面的研究。

Email:guoshuxia0223@163.com

beam anti-jamming receiver.

Key words: satellite navigation receiver;　wide angle;　multi-state joint calibration;
gray relational analysis;　scene mapping

0 引　言

卫星导航系统[1]是以人造卫星作为导航台的星基无线电导航系统,为全球用户提供全天候、实时、连续、高精度的导航、定位和授时服务,是支持国家经济建设和维护军事安全不可缺少的基础设施。由于卫星导航系统发射信号的功率很低,同时面临复杂电磁环境,易受到多种形式的有意或无意干扰,导致接收机的导航定位性能下降,多波束抗干扰技术能够提高接收机在复杂电磁环境中的生存能力。

为了测试与评估卫星导航接收机的抗干扰性能,必须建立相应的测试环境。目前主要有室外测试环境和室内测试环境,参考文献[2]研究了基于伪卫星网络的室外测试方法,利用伪卫星来模拟 GPS 卫星信号。室外测试环境虽然真实,但会受到外界环境的射频干扰,影响测试的精度和可信度,而且成本较高。

室内测试环境成本低、可控性好、重复性强,得到广泛应用。参考文献[3]通过转发器转发室外卫星导航信号到微波暗室,该方法虽能够得到实际的卫星信号,但容易受外界天气和卫星运动的影响,信号强度不确定;参考文献[4]在微波暗室内采用单通道模拟器产生卫星导航信号,采用单路输出方式,无法模拟卫星星座的空域特性;还有在微波暗室内采用球形面阵模拟卫星星座位置,但是这种测试环境的构建成本很高。

在室内无线环境下对导航接收机进行抗干扰测试时,导航信号模拟一般采用单路输出形式,无法模拟卫星空域位置关系,不能准确测试多波束抗干扰接收机的性能。针对上述问题,文中提出了一种基于微波暗室的大角域卫星导航接收机测试场景构建方法,利用已有 42°射频面阵,将接收机向面阵方向移动,扩大视场角。采用多状态联合校准方法对面阵天线单元到接收端的幅度和相位进行校准;并通过灰色关联分析方法,将卫星星座实际分布及动态干扰在微波暗室内进行物理映射,构造最大视场角为 160°的抗干扰测试场景,该方法不仅在室内无线环境下实现卫星导航接收机测试场景的逼近模拟,而且降低了成本。

1 多波束抗干扰接收机测试场景

多波束抗干扰[5]接收机室外测试场景如图 1 所示。工作原理是根据卫星星历解算出卫星信号的俯仰角和方位角,通过调节各个阵元的加权系数,自适应调准天线阵的方向图,在卫星信号方向形成主波束,同时将零瓣或旁瓣指向干扰信号方向,从而达到抗干扰的目的。

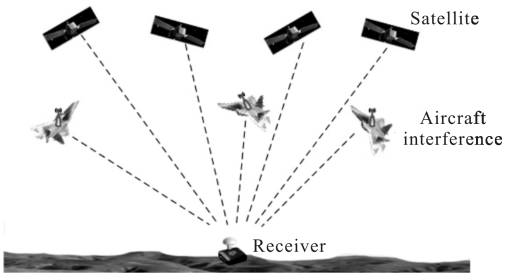

图 1 多波束抗干扰接收机测试场景

Fig.1 Test scenario of multi-beam anti-jamming receiver

目前在室内无线环境下对导航接收机进行抗干扰测试时,导航信号模拟通常采用单路输出形式,无法模拟卫星星座空间位置关系;通常采用几个固定位置的辐射天线来模拟干扰信号,不能够逼真的模拟外界动态干扰[6]信号。因此,为保证在室内无线环境下对多波束抗干扰接收机性能测试的准确性,对测试环境要求如下:

(1) 将卫星实际分布在微波暗室内物理映射,模拟至少 4 颗卫星的空域位置关系,已有微波暗室模拟信号的视场角为 42°,无法满足卫星角域关系;

(2) 在室内无线环境下完成多波束接收机的抗干扰性能测试,需模拟动态干扰,实现外部复杂电磁干扰环境的复现。

2 室内大角域测试场景构建方法

已有微波暗室的射频面阵模拟系统有 211 个天

线单元，面阵为球冠结构，微波暗室内原转台距离射频面阵 l 为 12 m，视场角 β 为 42°(±21°)，模拟多个卫星星座及动态干扰的空间范围有限；为了满足多波束抗干扰接收机的室内测试环境，通过将转台向面阵方向移动距离 d 为 10.4 m，视场角 α 扩大至 160°(±80°)，基本上达到上半空间角域模拟能力，如图 2 所示。

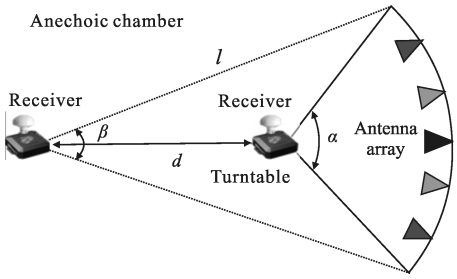

图 2 室内大角域测试场景构建方法

Fig.2 Indoor construction method of wide angle test scene

2.1 基于幅度和相位多状态联合校准

视场角的扩大造成了接收机不在面阵球心，面阵各个天线单元辐射到接收机位置处的信号的幅度和相位不一致。

文中采用幅度和相位多状态联合校准方法对面阵各天线单元进行校准，阵列天线结构图如图 3 所示，接收天线放置转台上，与面阵的距离满足远场条件，通过控制器改变衰减器和移相器的状态，进而改变馈给每个天线单元的信号幅度和相位，在三个幅度状态和一个相位状态下测量被校准天线单元在接收天线处的功率响应，根据所测得的功率值计算出各通道相对于参考信号的相对幅度和相对相位。

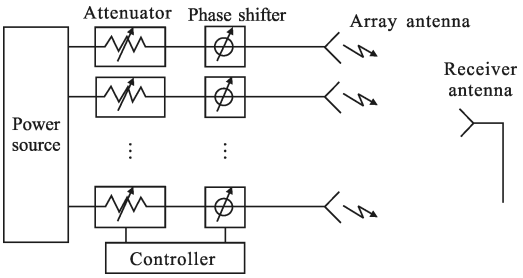

图 3 阵列天线结构图

Fig.3 Array antenna diagram

面阵各天线单元在接收天线处产生的初始场矢量表示为：$\vec{E}_n=E_n e^{j\varphi}$，其中 $n=1,2,\cdots,211$ 为各天线单元，E_n 和 φ_n 为各天线单元在接收天线处产生的初始场矢量的幅值和相位，则阵列天线在接收天线处产生的初始合成场矢量 $\vec{E}_0=E_0 e^{j\varphi_0}$。

选取阵列天线中的第 n 个天线单元及与其相连的衰减器和移相器作为被校准通道，将此通道衰减器的衰减系数由初始值变为 a_1，再由 a_1 变为 a_2，分别获取衰减系数为 a_1 和 a_2 时阵列天线在接收天线处产生的合成场矢量为：

$$\overrightarrow{E_{n1}}=E_0 e^{j\varphi_0}-E_n e^{j\varphi_n}+a_1 E_n e^{j\varphi_n} \tag{1}$$

$$\overrightarrow{E_{n2}}=E_0 e^{j\varphi_0}-E_n e^{j\varphi_n}+a_2 E_n e^{j\varphi_n} \tag{2}$$

在初始状态、衰减系数为 a_1、衰减系数为 a_2 三种状态下的信号功率分别为 P_{n0}、P_{n1}、P_{n2}：

$$P_{n0}=|\vec{E}_0|^2=E_0^2 \tag{3}$$

$$P_{n1}=|\overrightarrow{E_{n1}}|^2=E_0^2+(a_1-1)^2E_n^2+2(a_1-1)E_0E_n\cos(\varphi_n-\varphi_0) \tag{4}$$

$$P_{n2}=|\overrightarrow{E_{n2}}|^2=E_0^2+(a_2-1)^2E_n^2+2(a_2-1)E_0E_n\cos(\varphi_n-\varphi_0) \tag{5}$$

则此被校准通道的相对幅度：

$$A_n=\frac{E_n}{E_0}=\sqrt{\frac{a_2(R_2-1)-a_1(R_2-1)+R_2-R_1}{(a_1-1)(a_2-1)(a_1-a_2)}} \tag{6}$$

相对相位：

$$\Delta\varphi_n=\varphi_n-\varphi_0 \tag{7}$$

其中：

$$R_1=\frac{P_{n1}}{P_{n0}}=1+(a_1-1)^2A_n^2+2(a_1-1)A_n\cos(\Delta\varphi_n) \tag{8}$$

$$R_2=\frac{P_{n2}}{P_{n0}}=1+(a_2-1)^2A_n^2+2(a_2-1)A_n\cos(\Delta\varphi_n) \tag{9}$$

被校准通道的衰减系数为 a_2 保持不变，移相器的相位改变 $\Delta\varphi=90°$，得到此状态下接收天线接收到的信号功率 P'_{n2}，则：

$$R_2'=\frac{P'_{n2}}{P_{n0}}=1+(a_2-1)^2A_n^2-2(a_2-1)A_n\sin(\Delta\varphi_n) \tag{10}$$

$$\sin(\Delta\varphi_n)=\frac{1}{2}\left[\frac{1-R_2'}{A_n(a_1-1)}-A_n(a_2-1)\right] \tag{11}$$

因此，被校准通道的相对相位：

$$\Delta\varphi_n=\arctan\left[\frac{1-R_2'-A_n^2(a_2-1)^2}{R_1-1-A_n^2(a_1-1)^2}\cdot\frac{a_1-1}{a_2-1}\right] \tag{12}$$

通过此方法依次得到阵列天线中各通道的相对幅度和相对相位，若不一致，则调整各天线单元通道中衰减器的衰减系数和相位器的相位系数，使得各通道的相对幅度和相对相位一致。从而保证每一路信号到达接收天线的幅度、相位的一致性。

2.2 基于灰色关联分析的场景映射

灰色关联分析法[7-9]是分析系统之间相似或相异的关联程度，主要用于分析系统各因素之间的相关特征，从而挖掘出系统的主要影响因素。

首先在微波暗室内实现某时刻卫星星座的物理映射。假设微波暗室内面阵上 $n(n=211)$ 个天线单元相对于移动后转台位置的角域关系为 $E(n)$，其中 $E(n)=\{(\varphi_1',\theta_1'),(\varphi_2',\theta_2'),\cdots(\varphi_n',\theta_n')\}$；根据当前卫星星历对接收机坐标系下卫星星座位置解算，计算某时刻可见 m 颗卫星相对于接收机的角域关系，记为 $\Gamma(m)$，其中 $\Gamma(m)=\{(\hat{\varphi}_1,\hat{\theta}_1),(\hat{\varphi}_2,\hat{\theta}_2),\cdots(\hat{\varphi}_m,\hat{\theta}_m)\}$，$1\leqslant m\leqslant n$。根据排列组合原理，将 $\Gamma(m)$ 排列后得到 $H_\vartheta(m)$，其中，$\vartheta=1,2,\cdots,A_n^m$。将 $E(m)$ 作为主因子，$H_\vartheta(m)$ 作为影响因子，其关联系数为：

$$\zeta_\vartheta(m)=\frac{\min\limits_{\vartheta}\min\limits_{m}\omega+\rho\max\limits_{\vartheta}\max\limits_{m}\omega}{\omega+\rho\max\limits_{\vartheta}\max\limits_{m}\omega} \tag{13}$$

式中：$\omega=|E(m)-H_\vartheta(m)|$；$\zeta_\vartheta(m)$ 为影响因子序列 $H_\vartheta(m)$ 对主因子序列 $E(m)$ 的关联系数；ρ 为分辨系数，一般取 $\rho=0.5$。为方便比较分析，对关联系数进行平均化处理：

$$r_\vartheta(m)=\frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n}\zeta_\vartheta(p) \tag{14}$$

式中：$\vartheta=1,2,\cdots,A_n^m$；$n=m!$；$r_\vartheta$ 为影响因子序列 $H_\vartheta(n)$ 对主因子序列 $E(n)$ 的关联度。

选取相关度最大，作为星座映射依据。最后采用多通道导航信号模拟器，实现导航信号空域模拟。

动态干扰的室内映射与卫星星座类似，同样，假设微波暗室内射频面阵系统中 n 个辐射天线单元相对于移动后转台位置的角域关系为 $E(n)$；实时计算接收机所面临的 j 个机载干扰源与接收机的角域关系，记为 $T(j)$，$1\leqslant j\leqslant n$，$T(j)=\{(\varphi_1'',\theta_1''),(\varphi_2'',\theta_2''),\cdots(\varphi_j'',\theta_j'')\}$。根据上述灰色关联分析方法，选择出每一时刻与实际干扰场景角域关系最接近的 j 根辐射天线，作为干扰源的辐射天线。

在仿真的每一时刻各个干扰源相对于接收机的角域位置关系以及干扰源到达接收机的辐射功率实时变化，因此干扰源到达接收机的辐射功率需要不断调整。根据实时动态功率解算[10]公式，获取干扰信号到达接收机的准确功率，为卫星导航接收机在动态干扰环境下抗干扰测试提供逼近真实的功率计算准则。干扰源到接收机的实时动态功率解算方法表示为：

$$P=P_t+G_t+20*\lg(c/f)-20*\lg(4*\pi)-20*\lg(R) \tag{15}$$

式中：P_t 表示干扰源的发射功率；G_t 表示干扰源发射天线增益；f 表示载波频率；R 表示导航接收机与干扰源之间的距离；$c=3.0\times10^8$ m/s 为电磁波传播速度。

3 仿真测试结果

根据卫星星历仿真，2013 年 7 月 3 日 22 时西安上空卫星星座图的空间分布图如图 4 所示，可见卫星数目为 7 颗，经过计算，卫星星座在导航接收机坐标系下角域位置关系分别为：$(\hat{\varphi}_1,\hat{\theta}_1),\cdots,(\hat{\varphi}_7,\hat{\theta}_7)$，如表 1 所示。

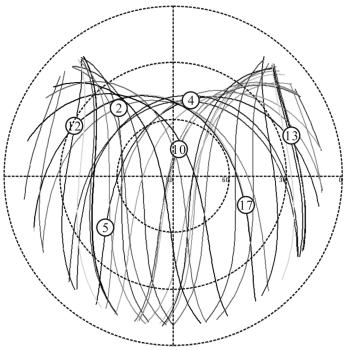

图 4 卫星星座空间分布

Fig.4 Spatial distribution of satellite constellations

表 1 卫星相对于接收机的角域位置关系

Tab.1 Angular domain positional relationship of satellite relative receiver

Satellite number		2	4	5	10	12	13	17
Angle	$\hat{\varphi}$/(°)	235	290	138	273	211	336	28
	$\hat{\theta}$/(°)	42	43	45	75	32	26	51

微波暗室内211 个辐射天线相对于移动后转台的角域位置关系为：(φ_1',θ_1')，$\cdots$，$(\varphi_{211}',\theta_{211}')$。采用灰色关联分析对 $(\hat{\varphi}_j,\hat{\theta}_j)$ 以及 (φ_i',θ_i') 进行相关性分析，选取相关度最大值对应的 7 个天线单元，如表 2 所示，角域最大误差在 10°之内，若采用七元阵抗干扰天线，生成的波束宽度为 40°~60°，高增益波束的 3 dB 宽度约 25°，所以模拟星座即使有几度的位置偏差仍在高增益波束的 3 dB 宽度内，基本实现了卫星星座的空域模拟。

表 2 天线单元相对于转台的角域位置关系

Tab.2 Angular domain positional relationship of antenna relative turntable

Antenna number		A 72	A 77	A 120	A 123	A 136	A 139	A 203
Angle	$\hat{\varphi}/(°)$	240	300	120	270	210	330	30
	$\hat{\theta}/(°)$	41.5	41.5	46.9	75.7	32.5	32.5	53.8

实际场景中存在两个机载(无人机)干扰源,无人机飞行航迹为 10 个仿真时刻,起始时刻场景中接收机、机载干扰源位置坐标如表 3 所示,起始时刻干扰源相对于接收机的角域位置关系为 (20°,70°),(350°,72°),随着无人机的飞行,干扰源相对接收机角域位置关系不断发生变化。在微波暗室内模拟卫星星座、动态干扰的映射结果如图 5 所示。

表 3 起始时刻仿真对象的位置坐标

Tab.3 Position coordinates of simulated objects at the initial moment

Objects	Coordinate		
	X(*m*)	*Y*(*m*)	*Z*(*m*)
Receiver	110 949	67 699	0
Airborne	124 232.69	35 329.73	1 000
Airborne	118 567.53	31 856.96	1 000

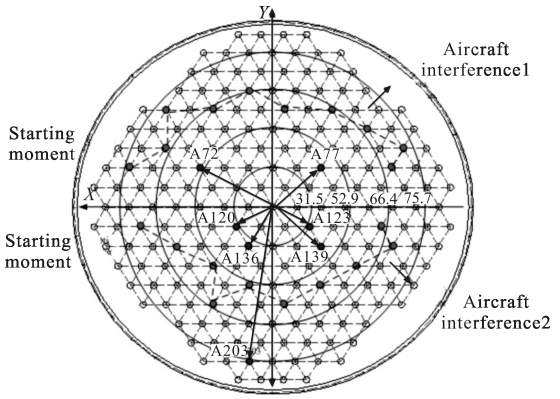

图 5 暗室内卫星星座、动态干扰映射结果图

Fig.5 Mapping results of satellite constellation and dynamic interference in the anechoic chamber

通过理论计算，实际场景中干扰到达导航接收机口面的功率值,如图 6 所示。

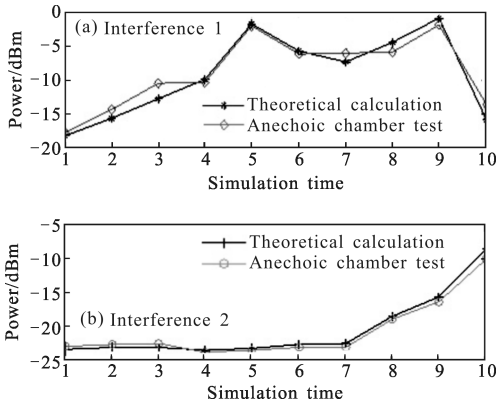

图 6 每一时刻功率曲线

Fig.6 Curves for power values at every moment

从图 6 中可以看出,两个动态干扰在实际场景与暗室模拟环境下到达导航接收机的功率基本一致。

在微波暗室内，分别采用已有的测试方法和大角域测试方法对同一多波束接收机的抗干扰性能进行了测试,测试结果如图 7 所示,在大角域测试环境下,当干信比增加到 92 dB 时,接收机失锁;然而采用已有的测试方法，在干信比增加到 85 dB 时接收机已经失锁。因此可以看出,采用大角域测试场景更能够准确地测试出多波束接收机的抗干扰性能。

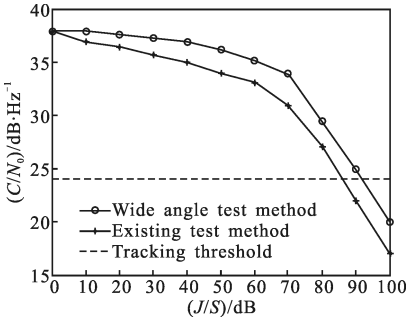

图 7 抗干扰性能测试曲线

Fig.7 Test curves of the anti-jamming performance

4 结 论

为了满足多波束抗干扰接收机室内无线测试环境的需求，文中提出了一种基于微波暗室的大角域测试场景构建方法,利用已有 42°射频面阵,将接收机向面阵方向移动 1.6 m,视场角扩大至 160°,首先采用多状态联合校准方法对面阵天线单元到接收端的幅度和相位进行校准，保证各个天线单元到接收机的幅度、相位一致;然后采用灰色关联分析方法评估实际场景与室内模拟场景的相关度，将实际环境

下的卫星星座、动态干扰在微波暗室内实现逼真映射，最终在微波暗室内实现了卫星导航接收机测试场景的逼近模拟，并完成了多波束接收机的抗干扰性能测试。

参考文献:

[1] Dow John M, Neilan R E, Rizos C. The International GNSS service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. ***Journal of Geodesy***, 2009, 83(3-4): 191-198.

[2] Yu Baoguo, Li Jun, Wang Zhenling, et al. China Galileo test range research and status [J]. ***Scientia Sinica***, 2011, 41(5): 528-538. (in Chinese)
蔚保国, 李隽, 王振岭, 等. 中国伽利略测试场研究进展[J]. 中国科学, 2011, 41(5): 528-538.

[3] Feng Qi, Zhu Chang, Yuan Naichang. Evaluation of adaptive array for satellite navigation receivers[J]. ***Chinese Journal of Radio Science***, 2008, 23(5): 847-850. (in Chinese)
冯起, 朱畅, 袁乃昌. 卫星导航接收机自适应阵仿真测试评估[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 847-850.

[4] Jia Chaoguang, Wang Junya, Dong Xiaohuan. The test method of Beidou receiver based on the satellite signal simulator [C]//The Fourth China Satellite Navigation Conference, 2012. (in Chinese)
贾超广, 王俊亚, 董小环. 基于卫星信号模拟器的北斗接收机测试方法 [C]//第四届中国卫星导航学术年会电子文集, 2012.

[5] Zhang Xing, Zhang Kun, Bi Yanbo, et al. Multi-beam anti-jamming technique in satellite navigation receiver [J]. ***GNSS World of China***, 2012, 37(5): 46-51. (in Chinese)
张星, 张昆, 毕彦博, 等. 卫星导航接收机中多波束抗干扰技术[J]. 全球定位系统, 2012, 37(5): 46-51.

[6] Foegelle Michael D. The masters of MIMO: creating a complex multipath environment simu-lation in an anechoic CHAM-BER[J]. ***Microwave Journal***, 2010, 53: 56-64

[7] Di Yuchun, Deng Yanping. Performance evaluation based on the grey relational grade of image segmentation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 1999, 28(3): 1-7. (in Chinese)
狄宇春, 邓雁萍. 基于灰色关联度分析的图像分割性能评估[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(3): 1-7.

[8] Hu Zhonghua, Zhao Min, Yao Min. Multi-objective and multi-constrained UAV path plan optimum selection based on GRA[J]. ***Journal of Grey System***, 2011, 23(1): 35-46.

[9] Guo Shuxia, Dong Zhongyao, Gao Ying. Construction method of anti-jamming performance test system for navigation satellite receiver [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(8): 2150-2155. (in Chinese)
郭淑霞, 董中要, 高颖. 星导航接收端抗干扰性能测试平台构建方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2150-2155.

[10] Paul Hallbjorner, Ulf Carlberg, Kent Madsen, et al. Extracing electrical material parameters of electrically large dielectri objects from reverberation chamber measurements of absoption cross section [J]. ***IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility***, 2005, 47(2): 291-303.