

The Protection and Electromagnetic Interference between Tracking Radar and Marine Radar Based on Ship

Jia Ouyang^{1,2}, Gang Wang¹, Wenhua Zhao^{1,2}, Guohu Xue¹

¹China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin Jiangsu

²Joint Laboratory of Ocean-Based Flight Vehicle Measurement and Control, Jiangyin Jiangsu

Email: akaerguli@hotmail.com

Received: Mar. 9th, 2015; accepted: Mar. 25th, 2015; published: Mar. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, the electromagnetic interferences between tracking radar and marine radar at X-band and S-band are investigated. Far-field radiation patterns of the tracking radars and the coupling between them and the marine radar are calculated and simulated by adopting time-domain finite element integration algorithm and a general fast electromagnetics algorithm based on MLFMM (multilevel fast multipole), high-frequency physical optics and shooting-and-bouncing-rays method. The results are verified by test and protection measures are suggested.

Keywords

Tracking Ship, Tracking Radar, Marine Radar, Antenna Mutual Coupling

船载测量天线与导航雷达工作 电磁环境影响与防护

欧阳佳^{1,2}, 王 刚¹, 赵文华^{1,2}, 薛国虎¹

¹中国卫星海上测控部, 江苏 江阴

²飞行器海上测量与控制联合实验室, 江苏 江阴

Email: akaerguli@hotmail.com

收稿日期：2015年3月9日；录用日期：2015年3月25日；发布日期：2015年3月30日

摘要

本文主要针对测量船X频段和S频段测量雷达与导航雷达同频段设备间的电磁干扰问题进行了仿真研究，采用基于时域有限积分的有限元算法和基于MLFMM、高频物理光学和弹跳射线的通用快速电磁计算算法，对测量船X频段和S频段测量雷达的远场辐射方向图、测量雷达与导航雷达耦合度计算等方面进行了仿真计算，并结合设备实测对仿真结果进行了验证。根据仿真结果和实测数据给出了测量雷达的防护措施建议。

关键词

测量船，测量天线，导航雷达，天线互耦

1. 引言

航天测量船在上甲板，安装了船舶、气象、测控、通信系统几十台套无线电设备及天线，在加装 X 频段测量天线后，连同 S 频段测量天线与 X 频段、S 频段导航雷达的电磁兼容问题尤为突出。在以往的试验中，采用 S 频段导航雷达关闭的措施以避免 S 频段测量天线工作受影响，没有对导航雷达与测控天线的工作电磁环境进行分析。在 X 频段和 S 频段测量天线需要同时工作的情况下，为保障航行安全，无法采用同时关闭 X 频段、S 频段导航雷达的方式进行电磁安全防护，这就需要对测控天线与导航雷达的工作电磁兼容性问题进行具体分析。

天线电磁兼容问题的研究包括天线单元、天线馈电及其系统的电磁兼容设计、天线与载体及相关无线电设备间的电磁兼容设计等等，其中最重要的是天线的合理布局问题。

天线互耦的计算是进行天线布局设计不可缺少的一步，也是复杂系统电磁兼容分析的重要组成部分。而对天线互耦进行快速分析能够最大程度地保证系统电磁兼容设计的效率。

复杂系统的电子设备的工作频段往往相距较远，且随着超宽带雷达、扩频体制通信系统的广泛应用，天线互耦的计算也由过去的点频计算变成了宽带问题。随之而来的问题是，宽频带内分析电大平台上的天线特性，其计算量非常大，对现有的电磁场数值方法是一个巨大挑战。

本文采用电磁仿真软件将同频段天线的互扰情况通过理论计算方法直观的展示，能够更好地为测量天线制定相关防护措施提供支撑，为下一步新测量船电子设备装船提供技术支持，也能为相关试验的完成提供技术保障。

2. 常用电磁计算方法研究

目前常用电磁计算方法有解析法、近似法和数值法。解析法是指建立严格的偏微分方程或者积分方程并对其求解的方法，优点是可以计算出精确的结果，但在电磁学领域，实际上只有极少数问题，其几何形状符合和正交坐标系共性的条件，可以得到有效解，因此解析法的应用并不广；近似法也可以认为是一种解析法，但不是严格解析法，它可以求解一些用严格解析法不能解决的问题；数值法一般来说是将 Maxwell 方程或相关的积分方程转化成一个矩阵方程，然后运用计算机编程求解，数值法的优点显而易见：能够快速方便地进行求解。且随着计算机性能不断提高，数值法的优点更加明显，其优势得到了

充分的发挥，数值法也得到了越来越广泛的应用[1]。

2.1. 时域有限积分算法

电磁计算是根据 Maxwell 方程组，利用适当的边界条件确定所关心区域或物体内的电磁场分布或电流分布，进而给出所需要的物理参量。

Maxwell 方程组的积分形式为：

$$\begin{cases} \oint_C \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_C \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_S \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{S} = 0 \\ \oint_S \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho(\mathbf{r}, t) \cdot dV \end{cases} \quad (1)$$

式中： \mathbf{r} 为位置矢量； $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 为电场矢量(V/m)； $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ 为磁场矢量(A/m)； $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ 为电通量密度(C/m²)； $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 为磁通量密度或磁感应强度(T)； $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ 为电流密度(A/m²)； $\rho(\mathbf{r}, t)$ 为电荷密度(C/m³)；方程组的第一、二式的 S 是曲线 C 围成的面积， $d\mathbf{S}$ 是 S 上的有向面元(从曲面内向外)， $d\mathbf{l}$ 是 l 上的有向线元；方程组的第三、四式中的 S 是一封闭曲面， V 是曲面围成的体积， $d\mathbf{S}$ 是有向面元(从曲面内向外)， dV 是体积元。

时域有限积分方法是一种全波电磁算法，是基于 Maxwell 方程的一种解析算法，也是求解电磁兼容问题的精确方法。

2.2. 高频渐近电磁算法

几何光学(GO)、物理光学(PO)、一致性绕射理论(UTD)、几何绕射理论(GTD)、射线跟踪(RT)以及弹跳射线法(SBR)等均称之为高频渐近算法[2]。

此类算法的一个共同特点是频域和格林函数。已知源点分布通过广义格林函数计算得出场点的电磁场。每次仿真只能得出一个场点的值[3]。而全波方法则恰恰相反，每次仿真得出整个计算空间任意一点上的电磁场值。另外，高频算法不适用于闭域和电小问题，大量的反射次数和损耗以及相位差的精确计算均无法保证高频方法的求解精度。

3. 仿真结构建模

测量船上甲板结构复杂，其对电磁信号的影响较大，造成测量船电磁环境异常复杂。另外无线电信号波长 λ 跨度从 0.04 m (7500 MHz)到 0.15 m (2000 MHz)。整个测量船电尺寸达到了 2000 λ ~5000 λ 。所以在分析相关电子设备电磁兼容问题时，对测量船船体结构和电子设备的结构建模就非常必要。

3.1. 船体简化模型

运用软件仿真电磁场环境，在应到某一具体情况上时，其建模和参数设置等问题也有所不同，而建模和这些参数设置的合理与否对仿真结果有较大影响，若设置不当，仿真结果会产生较大的人为误差，因此需要研究特定情况下如何建模以及参数如何设置等问题，以减小人为误差，保证计算结果的正确性[4]。同时，测量船船体结构长约 200 余米，上层建筑结构复杂，在对其进行电磁仿真时，也需对其进行简化建模。测量船船体模型和简化模型如图 1、图 2 所示。

3.2. 导航雷达天线模型

测量船使用的导航雷达是 Bridge Master E Radar，其使用的是 2.4 m X 频段导航雷达和 3.7 m S 频段



Figure 1. 3D model of space tracking ship

图 1. 测量船模型图

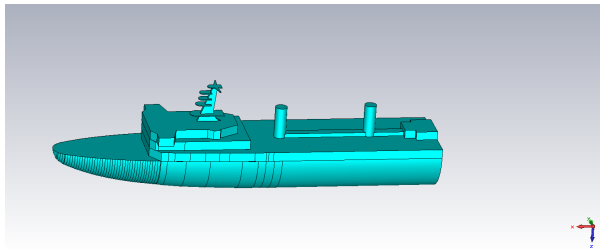


Figure 2. Simplify model for the simulation

图 2. 测量船简化模型图

导航雷达。其中 X 频段导航雷达工作频率为 $9410 \text{ MHz} \pm 30 \text{ MHz}$ ，水平波束宽度为 1° (3 dB)，垂直波束宽度为 24° (3 dB)，天线增益为 31 dB，辐射强度为 10 kW 和 25 kW。S 频段导航雷达工作频率为 $3050 \text{ MHz} \pm 10 \text{ MHz}$ ，水平波束宽度为 2° (3 dB)，垂直波束宽度为 30° (3 dB)，天线增益为 26 dB，辐射强度为 30 kW。本文根据其具体参数，采用辐射特性类似的标准喇叭天线进行替代计算。

3.3. 测量天线模型

测量船上安装的 S 频段天线分为主天线和自引导天线。主天线由 12 m 格里高利双反射面修正天线和圆波导 TE11 和 TE21 模自跟踪馈源、俯仰旋转关节、方位多通道高频滑环等组成。其中主馈源网络由 S 频段波纹喇叭、S 频段宽带 TE21 模耦合器、跟踪合成网络、圆极化分离器、收发双工器、收阻滤波器等组成。天线反射面和波纹喇叭模型如图 3 和图 4 所示。

X 频段主天线采用 12 m 标准型卡塞格伦双发射面天线，采用双频馈源设计。其双频馈源均采用小张角波纹喇叭，小张角波纹喇叭优点是交叉极化电平低，具有良好的驻波特性，辐射方向图等化性能优良。天线反射面和波纹喇叭模型如图 5 和图 6 所示。

4. 天线互耦计算

4.1. 天线方向图计算

对于导航雷达，采用等效的喇叭天线替代导航雷达，得到天线辐射图如图 7 所示。

首先采用全波方法对 S 频段测量天线馈源进行仿真，将得到的馈源辐射方向图，加载至天线中，通过仿真得到 USB 天线整体辐射方向图($F = 2100 \text{ MHz}$)，其天线增益为 47.1 dB，如图 8 所示。

同样，对于 X 频段馈源及主天线辐射方向图的仿真方法如上，主要区别在于 X 频段天线在网格数上比 S 频段天线网格数大大增加，使得仿真计算较为费时，也在一定程度上影响计算精度。因此仅对其馈源部分进行仿真($F = 8450 \text{ MHz}$)，其增益约为 19 dB。

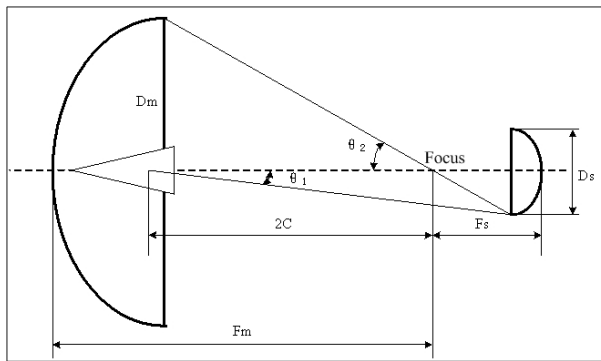


Figure 3. Structure of S-band tracking antenna
图 3. S 频段测量天线结构示意图

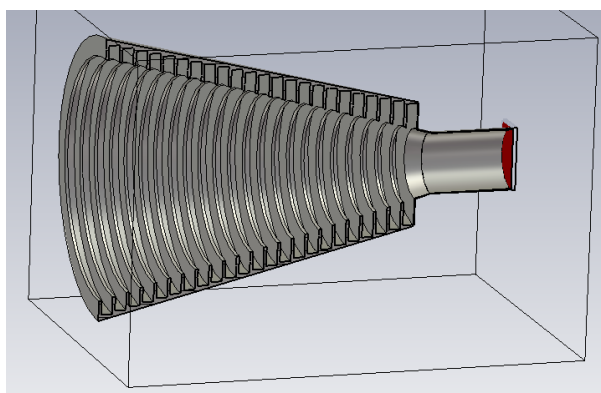


Figure 4. Model of S-band ripple horn
图 4. S 频段波纹喇叭结构模型

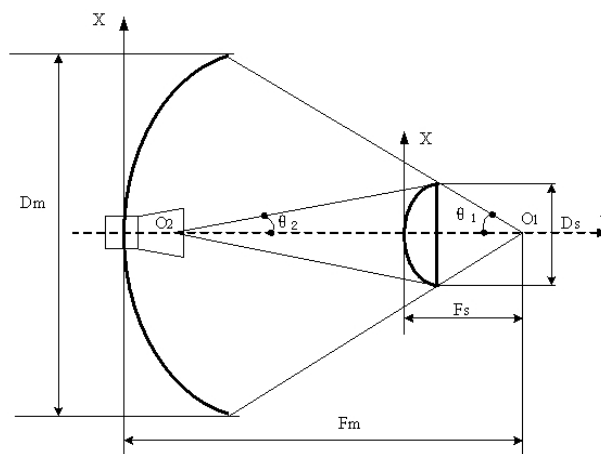


Figure 5. Structure of X-band tracking antenna
图 5. X 频段测量天线结构示意图

4.2. 多天线间的耦合仿真计算

测量船上分布了众多无线电设备，很多设备在同一时刻都在向外辐射功率，这些天线之间难免会发生相互耦合的现象，尤其当其频段较为接近的时候，因此针对频段相近的雷达天线互耦度进行计算十分重要[5]。

X 频段、S 频段测量天线和导航雷达天线在测量船上的安装位置如图 9 所示。

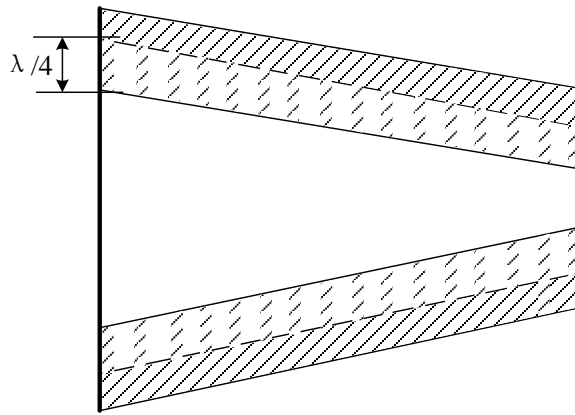


Figure 6. Model of X-band ripple horn
图 6. X 频段波纹喇叭结构模型

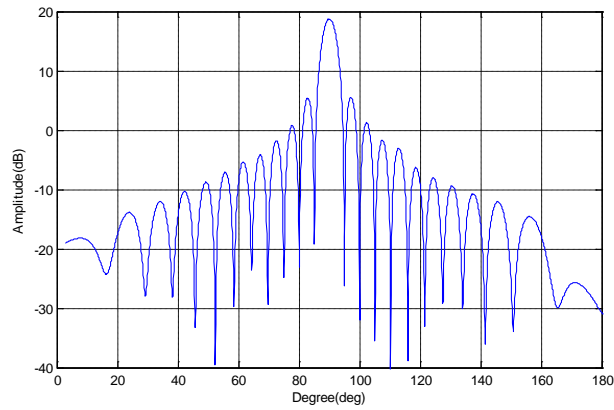


Figure 7. Antenna radiation pattern of marine radar
图 7. 导航雷达天线辐射方向图

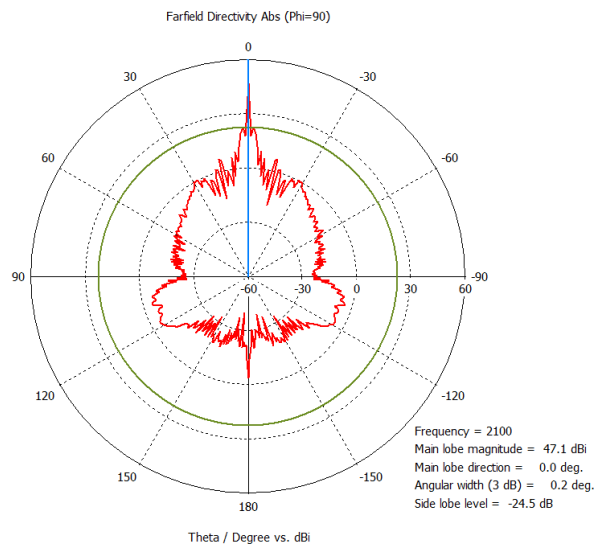


Figure 8. Antenna radiation pattern of S-band tracking radar
图 8. S 波段测量天线辐射方向图

利用前面得到的各天线方向图的计算结果，首先采取时域积分方法对导航雷达在测控天线工作频点

上重新计算得到其辐射方向图，然后再将导航雷达在测控天线工作频点上的辐射方向图放置于前桅相应位置，如图 10 所示，作为相关激励源，连同测量船船体结构利用高频近似求解算法，仿真得到其装载在船体结构后的辐射方向图，并将此保存为发射源。将测控天线远场辐射方向图保存为接收源，分别导入之前保存的发射源和接收源，输入相关位置关系，即可求解出两天线间的耦合度。分别对两组天线进行配对计算，结果如表 1 所示。

5. 测试与结果分析

5.1. 测试

5.1.1. X 频段导航雷达对 X 频段测量雷达的干扰试验

在进行该测试前，应对 X 频段测量雷达在 X 频段导航雷达发射频段的接收响应特性进行摸底测试。测试方法如下：在主桅附近放置喇叭天线面向测量天线，并接信号源。测量天线对准喇叭天线。信号源在工作频段扫频发射，发射功率 10 dBm 以上。在测量雷达接收链路低噪声放大器(LNA)前接入频谱仪，最大保持下观察信号的电平，估算测量雷达接收响应特性并估算 X 频段导航雷达满功率开机是否会烧毁 UXB 接收链路 LNA。如果估算可能会烧毁 UXB 接收链路 LNA，则在 X 频段导航雷达开机时，在测量雷达接收链

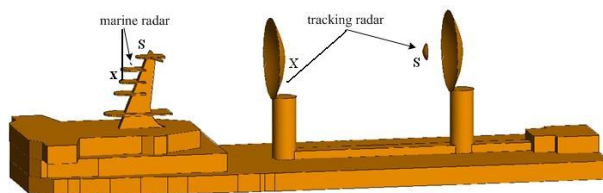


Figure 9. The positions of tracking radar and marine radar

图 9. 测量天线和导航雷达在测量船上的位置关系

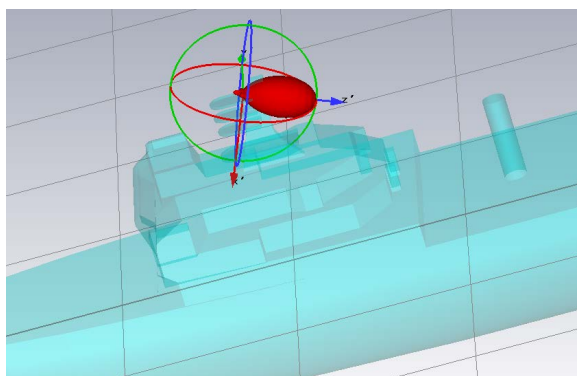


Figure 10. Antenna radiation pattern of marine radar on the ship

图 10. 导航天线辐射图加载至测量船上

Table 1. Simulation results of antenna mutual coupling

表 1. 天线耦合度计算结果

发射	接收	X 频段测量雷达	S 频段测量雷达	X 频段导航雷达	S 频段导航雷达
X 频段测量雷达				-143.6 dB	
S 频段测量雷达					-153.3 dB
X 频段导航雷达		-101.2 dB			
S 频段导航雷达			-103.4 dB		

路低噪声放大器(LNA)前接入衰减器和频谱仪，最大保持下观察信号的电平是否达到烧毁和饱和电平。必要时，在甲板用频谱仪直接测量 X 频段导航雷达的发射频谱。若测量雷达接收链路 LNA 前无法接入频谱仪，则 X 频段导航雷达正常开机(满功率、天线环扫)，UXB 天线指向 90° (与艏艉线垂直)、甲板俯仰角 20°，测量雷达主跟踪接收机和引导跟踪接收机均开机，观察是否受到干扰并记录。测量天线方位角缓慢步进向 X 频段导航雷达靠近，在测量雷达场放输出端用频谱仪监视干扰情况，若发现测量雷达设备 LNA 出现饱和，则记录方位角并终止测试。测量结果如图 11 所示，测量天线接收 X 频段导航雷达的功率为-33.51 dBm。

5.1.2. S 频段导航雷达对 S 频段测量雷达的干扰试验

S 频段系统测试方法与 X 频段系统测试方法基本一致。S 频段导航雷达正常开机(满功率，天线环扫)，测量天线指向船头、甲板俯仰角 5°，在场放输出端用频谱仪监视干扰情况，观察主跟踪接收机和引导跟踪接收机是否受到干扰并记录。测量结果如图 12 所示，测量天线接收 S 频段导航雷达的功率为-33 dBm。

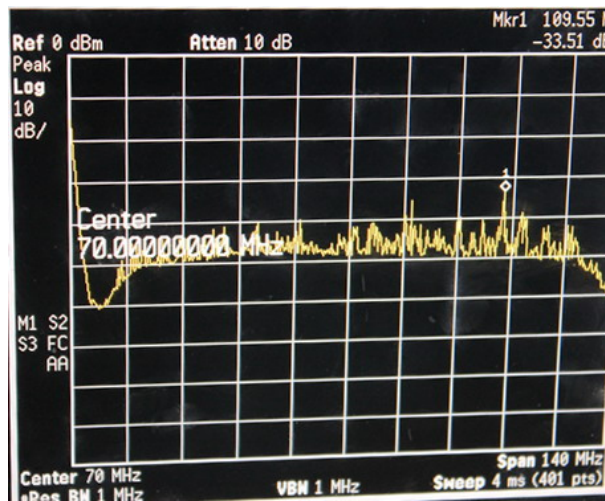


Figure 11. Receiving power value of X-band tracking radar from marine radar

图 11. X 频段测量天线接收到的导航雷达功率值

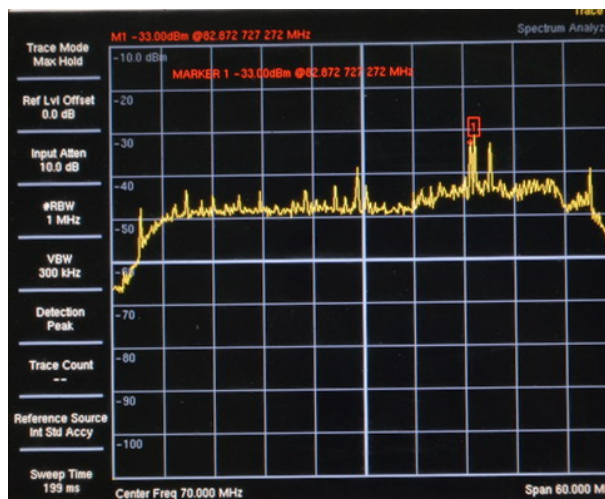


Figure 12. Receiving power value of S-band tracking radar from marine radar

图 12. S 频段测量天线接收到的导航雷达功率值

5.2. 测试与仿真结果分析

无线电设备间的耦合计算也可用近似公式 $A = 10 \log(P_r/P_t)$ 进行计算： P_r 为设备接收功率， P_t 为设备发射功率。以 X 频段导航雷达对 X 频段测量雷达耦合为例，已知发射功率 25 kW，接收功率为 -33.51 dBm (0.0005 mW)，可以得到天线耦合度为 $A = 10 \log(0.0005/25000000) = -107$ dB，与仿真计算值 -101.2 dB 比较吻合。同样，S 频段导航雷达对 S 频段测量雷达耦合为例，已知发射功率 30 kW，接收功率为 -33 dBm (0.0005 mW)，可以得到天线耦合度为 $A = 10 \log(0.0005/30000000) = -107.7$ dB，与仿真计算值 -103.3 dB 比较相近。

通过测量船天线耦合度电磁仿真分析与实测结果比对，证明了通过高频近似求解算法与时域积分算法相结合快速求解天线耦合度的方法在实际应用中的可行性。

6. 防护措施

6.1. S 频段测量雷达对 S 频段导航雷达发射信号的防护措施

从实测结果看，S 频段导航雷达对 USB 有影响。但 S 频段导航雷达和 USB 距离较远，且 S 频段导航雷达发射功率较低，对 USB 设备不会造成毁坏影响。试验期间，应关闭 S 频段导航雷达，防止其对 USB 设备正常接收卫星信号造成干扰。

6.2. X 频段测量雷达对 X 频段导航雷达发射信号的防护措施

应在天馈分系统的接收端(8400~8500 MHz)加抑制 9410 MHz \pm 30 MHz 的滤波器，其抑制度为 105 dB，确保 X 频段导航雷达正常工作时，新增加的 X 频段测量雷达也是也能正常工作，同时在测量雷达的场放内部也需要加抑制滤波器，其抑制度为 20 dB，这样一共就有 125 dB 的抑制度，确保了导航雷达工作时，其发射信号不会使测量雷达的场放饱和，确保系统能正常工作。

6.3. 新增防护措施建议

针对导航雷达带外辐射较为复杂情况，可对导航雷达本身做出一些技术改进，使相应频段的导航雷达带外发射频段在测量雷达接收频段内无较强的辐射信号，如可在导航雷达发射前端加装测量雷达接收频段的滤波器。其缺点是需对导航雷达设备进行改造。

另外一种防护措施为在导航雷达与测控天线之间增加微波吸收隔板，该隔板使用吸波材料，能有效阻止导航雷达带外杂散信号进入到测控天线馈源中。其缺点是会影响导航雷达后侧探测距离与效果。

7. 结论

本文针对测量船 X 频段、S 频段测量雷达和 X 频段导航雷达和 S 频段导航雷达同频段设备间存在的电磁干扰问题，利用目前比较先进的电磁数值仿真技术开展相关工作。首先对测量船主要装船电子设备电磁兼容性问题进行理论分析；采用基于时域有限积分的有限元算法和基于 MLFMM、高频物理光学和弹跳射线的通用快速电磁计算算法进行仿真，通过设备电磁兼容测试，将仿真结果和实测结果进行比对，验证了该仿真方法和软件的可行性。最后利用仿真和测试结果，针对测量雷达提出了相关防护措施的建議。

本文开展的测量船同频段测控天线和导航雷达天线间工作电磁环境的方法研究，不仅能将天线间的电磁干扰值通过数值仿真方法直观的显示，便于发现设备间存在的电磁干扰，为今后的全甲板面工作电磁环境仿真与测试打下良好的基础。

参考文献 (References)

- [1] 高牧纲 (2001) 电磁兼容总论. 北京邮电大学出版社, 北京.

- [2] Song, J.M. and Lu, C.C. (1997) Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **45**, 1488-1493.
- [3] Geng, N. and Sullivan, A. (2001) Fast multipole method for scattering from an arbitrary PEC target above or buried in a lossy half space. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **49**, 740-748.
- [4] 周佳, 谢康林 (2005) 舰船电磁兼容性仿真技术的发展与研究. *计算机工程*, **7**, 205-207.
- [5] 侯冬云, 汤恒正 (2002) 舰载系统的电磁环境及电磁兼容性要求. *舰船电子工程*, **4**, 59-61.