

# 米波天线地面反射对数字波束形成的影响分析

曹 钢,宋万杰,吴顺君

(西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室 陕西 西安 710071)

**摘 要:**针对米波雷达具有的良好地面反射的特点,分析了在地面起伏仰角大于零度和小于零度的情况下对米波雷达数字波束形成的影响,并且着重进行了当地面障碍物与天线之间存在一定距离时的情况下,对  $1^\circ \sim 30^\circ$  仰角范围内空域波束的威力影响分析,并用 Matlab 进行了仿真。最后对于一些典型的地面起伏情况做了简要的分析。

**关键词:**米波天线;地面反射;数字波束形成;Matlab

**中图分类号:** TN820.1

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1004-373X(2007)09-016-03

## Analysis of Effects to the DBF of Meterwave Antenna with Ground Reflection

CAO Gang, SONG Wanjie, WU Shunjun

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, 710071, China)

**Abstract:** This paper analyses effects to the DBF of meterwave antenna due to the good ground reflection characteristic of meterwave antenna, under the conditions of ground elevation being positive and negative, and makes further analysis of the beam power between the range  $1 \sim 30$  elevation angle with certain distance between barrier and antennae using Matlab. Finally, makes concise analysis to some typical ground.

**Keywords:** meterwave antenna; ground reflection; DBF; Matlab

## 1 引 言

米波段良好的地面反射特点,利用地面反射使接收的回波信号得到增强,这可以增大天线的作用距离,降低对发射机功率的要求。在数字波束形成阵列中,接收信号在单元级进行检测和数字化,然后由数字处理器形成波束。这种方法保存了各个单元信号所包含的全部信息,加上数字处理技术的灵活性,可获得超出普通阵列天线的性能。实现波束扫描、多波束、低副瓣、自适应波束形成和自校准功能。本文将具体分析不同的地面情况条件下对米波天线数字波束形成的影响。

## 2 理论模型

假定数字波束形成是对于天线接收下来的 5 路回波信号分别进行下变频、滤波和放大,使信号满足 ADC 转换器的要求,进行模/数变换形成 I、Q 两路正交基带信号。利用数字信号精度高、稳定性好的特点,使 I、Q 通道间的幅度一致性和相位正交性远优于传统正交解调方法。地面反射是米波天线在非自由空间传播时的一个最主要影响。在许多情况下地面可近似认为是镜反射的平面,这样天线接收到的回波信号就是直射波和反射波干涉的结果。

建立如图 1 所示的地面反射模型。

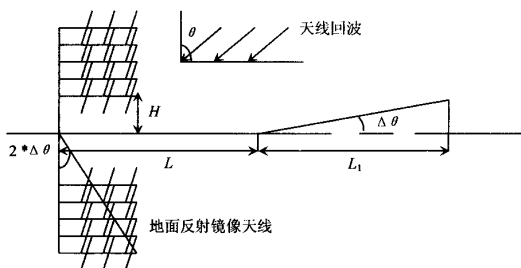


图 1 地面反射模型

如图 1 为天线俯仰面示意图,天线阵为 5 排自上而下编号为  $S_1 \sim S_5$ , 设最下面的一排天线  $S_5$  离地面高度为  $H$ , 5 排天线垂直间距为  $d$ , 入射波的波长为  $\lambda$ , 地面反射影响可以等效为地面镜像天线与实际天线组合成的天线阵对地面以上天线直射回波的处理情况, 地面反射镜像天线自上而下编号为  $T_1 \sim T_5$ , 地面倾角为  $\Delta\theta$ ,  $S_1 \sim S_5$  的地面镜像对应分别为  $T_5 \sim T_1$ , 入射波相对于天线阵列方向的夹角为  $\theta$ , 倾斜地面距离天线阵面的垂直距离为  $L$ , 则地面镜像天线阵排列方向相对于天线阵排列方向的夹角为  $2 * \Delta\theta$ . 天线  $T_5$  与  $S_5$  在入射波方向上的相位差为  $\Phi_1$ 。

可以计算得到  $\Phi_1 = 2 * H * \cos(\Delta\theta) * \cos(\theta + \Delta\theta)$ . 以  $S_1$  为基准天线, 若  $S_1$  接收到的天线回波信号初相位为  $\Phi_0$ , 那么天线  $S_1 \sim S_5$  和  $T_1 \sim T_5$  接收到的信号分别为:

$$S_i = \exp(j * \Phi_0) * \exp(-j * (i-1)\Phi) \quad (1)$$

$$T_i = S_5 * \exp(-j * \Phi_1) * \exp(-j * (i-1)\Phi_2) \quad (2)$$

其中  $i = 1 \sim 5; \Phi = 2 * p_i * d * \cos(\theta) / \lambda; \Phi_2 = 2 * p_i * d * \cos(\theta + 2 * \Delta\theta) / \lambda$ 。

设地面反射系数为  $r$ ，则：实际 5 路天线接收到包含地面反射的回波信号  $S_{i1 \sim i5}$  为  $S_i = S_i + r * T_i + n_i$ ；其中， $i = 1 \sim 5; n_i$  为高斯白噪声；

5 路天线和波束  $S_{i \text{ sum}} = S_{i1} + S_{i2} + S_{i3} + S_{i4} + S_{i5}$ ；  
设复权值为： $W = W_I + W_Q = e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$ ，信号为  $S = I_s + jQ_s$ ，将信号与权值进行复乘得到移相后的输出信号，即：

$$S\_W = S * W = (I_s + jQ_s) * (W_I + jW_Q)$$

要求波束要达到覆盖  $1 \sim 30^\circ$  空域。因此采用三组加权系数使波束指向不同仰角来达到威力要求。即：

$$S_{i \text{ w}1} = S_{i1} * W_{11} + S_{i2} * W_{21} + S_{i3} * W_{31} + S_{i4} * W_{41} + S_{i5} * W_{51} \tag{3}$$

$$S_{i \text{ w}2} = S_{i1} * W_{12} + S_{i2} * W_{22} + S_{i3} * W_{32} + S_{i4} * W_{42} + S_{i5} * W_{52} \tag{4}$$

$$S_{i \text{ w}3} = S_{i1} * W_{13} + S_{i2} * W_{23} + S_{i3} * W_{33} + S_{i4} * W_{43} + S_{i5} * W_{53} \tag{5}$$

三波束和信号为：  
 $S_{i \text{ w}} = \text{abs}(S_{i \text{ w}1}) + \text{abs}(S_{i \text{ w}2}) + \text{abs}(S_{i \text{ w}3})$  (6)  
式中， $W_{11}$  表示第一个波束 5 路加权值的第 1 个权； $S_{i \text{ w}1}$  表示第一个波束经 5 路加权后的复信号输出。

3 仿真分析

仿真中阵元因子为半波对称阵子，极化方式为水平极化。下面对不同仰角和地面反射条件下天线波束威力分别进行讨论。

3.1 单一地形

在  $r = -0.9, L = 0 \text{ m}, L_1 = 45 \text{ m}$  的条件下仿真结果如图 2、图 3 所示。

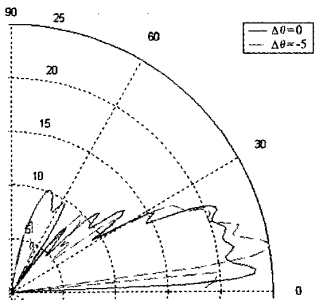


图 2 地面倾角为 +5°

由图 2 可以看出，当地面倾角为 +5° 时，合成波束整体向高仰角偏移，7°~15° 空域天线威力增强而在低仰角 0°~6° 范围由于地面上倾所以没有地面反射回波到达接收天线而大幅减弱，这将严重影响到天线低仰角空域的探

测能力，同时波束的高仰角副瓣电平略有降低，这减弱了高仰角方向上干扰对天线目标回波的影响。

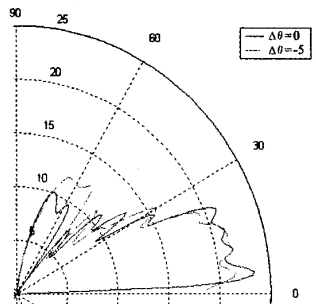


图 3 地面倾角为 -5°

由图 3 可以看出，当地面倾角为 -5° 时，合成波束整体向低仰角偏移，在水平方向天线波束威力不再为 0，仰角 1°~10° 的威力由于地面反射减弱略有下降，但仍能保证仰角 1°~30° 的威力覆盖。同时可以看到高仰角副瓣电平有大幅度的升高。

从以上两种情况可以看出地面倾斜都将导致天线低仰角空域探测能力降低。

3.2 一般情况

前面讨论了单一倾斜地面的情况，即倾斜地面距离天线阵面的垂直距离  $L = 0 \text{ m}$ ，在实际当中，地面是凹凸不平的，粗糙的反射面会使地面反射分量减少，进而影响到天线的作用范围。下面对于实际当中遇到的地面即有水平面也有倾角的综合情况作进一步的分析。

3.2.1 假设倾斜地面距离天线阵面的水平距离  $L = 50 \text{ m}$ ，倾斜地面水平长度  $L_1 = 45 \text{ m}$

如图 1 所示，50 m 以内为水平地面。

如图 4 所示，倾角  $\Delta\theta = -5^\circ$  时，仿真结果表明仰角 11°~90° 范围内波束形状不受倾斜地面的影响。此外，在低仰角 0°~11° 空域天线威力减弱。地面倾角  $\Delta\theta = +5^\circ$  时，图 5 在仰角 21°~90° 范围内波束形状不受影响，但仰角 5°~21° 大部分空域天线威力显著增强达 3 dB 以上，故可以考虑利用这种情况设计特定的地面倾斜角度和倾斜地面距离天线阵面的水平距离来加强局部空域的天线探测能力。

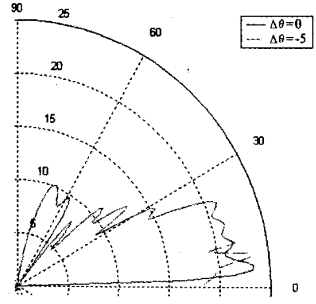
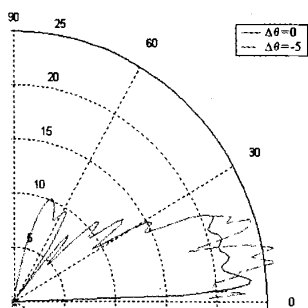
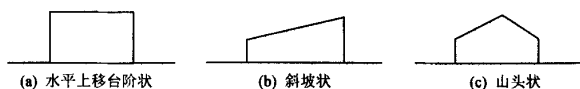


图 4 倾角 Δθ = -5°

图5 倾角  $\Delta\theta = +5^\circ$ 

### 3.2.2 一定距离范围内的典型地面起伏情况

分为3种情况,即:



(1) 地面突起表面为水平上移台阶状;

(2) 地面突起表面为斜坡;

(3) 地面突起表面为山头状。设径向长度=3 m,高度=2 m, $L=50$  m。

仿真分析得到,第一种情况分析,以最低的一排天线为例,可以将地面分为5段反射区,第一段反射区[0 m, 33.3 m],天线回波可以经过水平地面反射被天线接收。第二段反射区[33.3 m, 50 m],由于地面突起遮挡天线无

作者简介 曹 钢 男,1982年出生,硕士在读研究生。

(上接第15页)

前向空间平滑修正虽然得到了比较明显的谱峰,但是由于算法减小了阵列有效孔径,导致了分辨率的降低,可以看到两个信号的谱峰无法准确区分。前向-后向空间平滑算法在仿真中得到了区分明显的两个信号的尖锐的谱峰,能够比较准确地估计两个相干信源的波达方向。

### 参 考 文 献

[1] Dimitris G Manolakis, Vinay K Ingle, Stephen M Kogon.

法接收到天线回波。第三段反射区[50 m, 53 m]天线回波经突起地面反射被天线接收,但镜像天线的位置将改变。第四段反射区[53 m, 106 m],由于地面突起遮挡天线将无法接收到天线回波。第五段反射区为106 m以外区域,天线回波可以经过水平地面反射被天线接收。所以其威力在仰角 $[2.16^\circ, 6.84^\circ]$ 范围内将受到地面起伏的影响。同理,分析其余4路天线,综合得到波束在仰角 $[2.16^\circ, 13.5^\circ]$ 范围内将受到影响而使其范围内的大部分仰角区域的天线威力减弱。对于其他情况,类似的可将其分为不同的反射区逐段分析得到。

### 4 结 语

本文讨论了米波天线在地面反射方面,不同地面起伏的情况下对于天线波束形成的影响,还对地面为水平面和斜面组合的各种情况作了详细的分析。此外,针对不同频率,不同反射系数及复杂的地面起伏的组合情况还应做进一步研究。

### 参 考 文 献

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

[2] 魏文元,宫德明,陈必森. 天线原理[M]. 北京:国防工业出版社,1985.

Statisticcal and Adaptive Signal Processing[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

[2] 张贤达. 现代信号处理.[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[3] Shan T J, Kailath T. Adaptive Beamforming for Coherent Signal and Interference[J]. IEEE Trans. 1985, ASSP - 33 (3).

[4] Pillai S U, Kwon B H. Forward/Backward Spatial Smoothing Techniques for Coherent Signal and Identification[J]. IEEE Trans. 1989, ASSP - 37(1).

作者简介 赵世峰 男,1980年出生,陕西西安人,在读硕士。主要从事智能交通及信号处理的研究。

欢迎订阅 2007 年度《现代电子技术》(半月刊)

邮发代号:52-126 定价:15 元/期 360 元/年价

电话:029-85393376 传真:029-85393376

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>