

## 参考文献

- 【1】 S.E.Miller, “ Couplerd wave theory and waveguide applications”,Bell syst.Tech.J.,May 1954,P661~719.
- 【2】 顾瑞龙, 沈民谊,《微波技术与天线》, 国防工业出版社 1980 年, P184~188。
- 【3】 Y.H.Chong, “ Wideband TM01-mode traveling wave coupler”,IEEE Proc.-Microw.Antennas Propag.,vol.144,No.5,Octorber 1997.
- 【4】 廖承恩,《微波技术》, 西安电子科技大学出版社 1994 年, p92~101。

### 作者简介

许 智 1978 年生, 2000 年至今, 在航天科技集团五院 504 所从事星载天线设计工作, 同时在西安电子科技大学攻读博士学位。  
 梁昌洪 1943 年生, 教授, 博士导师, 曾任西安电子科技大学校长, 中国电子学会会士, IEEE Senior member。主要从事计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面的研究。

## 散射天线主瓣波束的 UAV 散射通信侦察和干扰效能研究

全德臣 陈治平 叶结松 陈培彬  
 (解放军炮兵学院通信教研室 230037, 安徽, 合肥)  
 电子信箱:cjp1967@sina.com.cn, tel:0551-5768315(O)

**摘要:** 文章描述了无人机(UAV)巡航于散射公共体积内时, 采用无方向性天线, 对散射通信实施侦察干扰的估算问题。首先从技术上进行分析, 计算了实施干扰时的散射公共体积高度、尺寸和需要的干扰功率。最后, 对载体无人机的活动范围受到散射公共体积范围和视距范围进行了界定。

**关键词:** 无人机、散射、通信、功率、天线

### 0 引言

利用无人机机载电子干扰设备对敌进行干扰, 具备效率高、覆盖面广、适应性强的特点。可以实施临空干扰、加大有效干扰功率, 且与地面电子干扰机、机载电子干扰设备一起形成立体干扰的态势, 通常电子干扰无人机编组在电子干扰群升空干扰组内, 担负对敌纵深区域的战术通信、雷达信号的压制和干扰任务。对敌 C<sup>4</sup>ISR 系统的战术直接序列扩频和跳频通信线路、雷达站、预警系统以及民用通信网等实施大规模的压制式干扰, 可以破坏敌方的通信能力, 一举瘫痪敌指挥与情报作战能力, 扰乱敌防御部署。

### 1 散射公共体积高度的估算

利用散射天线主瓣波束实施侦察干扰, 需要估算出散射公共体积的高度。公共体积高度与通信距离和收发天线的仰角有关, 下面的估算是在以下条件下进行的, 即

a) 认为地球是理想的光滑圆球体; b) 散射收发天线的仰角均为 0°。

散射公共体积高度与通信距离的关系示于图 1 中。图中 A、B 为散射站位置, AB 之间的

大圆距离为 d, R<sub>0</sub> 为地球半径, R<sub>0</sub>=6370km。P 点为收发波束中心线的交点, PE 的高度 H<sub>1</sub> 即为散射公共体积中心到地面的高度。DE 的高度 H<sub>2</sub> 为 A、B 之间地球曲率的高度。α 为 A0、B0 之夹角。

由图可知:

$$d = \frac{2\pi R_0}{360} \cdot \alpha$$

故  $\alpha = \frac{360d}{2\pi R_0}$  (1)

又因  $\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{R_0}{R_0 + H_1}$

可得 :

$$H_1 = \frac{R_0}{\cos \frac{\alpha}{2}} - R_0 = R_0 \left( \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) \quad (2)$$

将 R<sub>0</sub>=6370km 和式(1)代入式(2), 经整理后得到:

$$H_1 = 6370 \left[ \frac{1}{\cos\left(\frac{d(km)}{222.37}\right)} - 1 \right] \quad (3)$$

式(3)即为散射高度  $H_1$  随通信距离  $d$  变化的关系式, 距离  $d$  为不同值时,  $H_1$  的计算结果如表 1 所示:

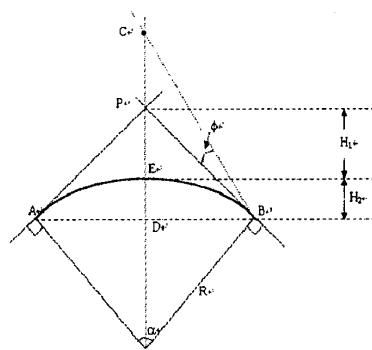


图 1 散射体高度与通信距离示意图

表 1 散射高度  $H$  随通信距离  $d$  变化的关系 (km)

$d$	100	200	300	500	700
$H_1$	0.20	0.79	1.77	4.90	9.63
$H_2$	0.15	0.59	1.32	3.68	7.21

$H_2$  的计算公式为:

$$H_2 = \frac{d^2}{8R_e} \quad (4)$$

式中,  $R_e$  为标准大气压下地球的等效半径,  $R_e=8500km$ 。

由表 1 可见, 当散射天线仰角为  $0^\circ$ 、通信距离为  $d=300km$  时, 散射公共体积中心的高度约为 1770m。在实际应用中, 为了避免地面障碍物对主瓣波束的遮挡, 散射天线仰角一般在  $1^\circ \sim 2^\circ$  左右, 这样, 散射公共体积的高度必然增高。如图 1 所示, 假设虚线 BC 为天线主瓣波束中心射线, 天线仰角为  $\phi$ , 且  $\phi > 0^\circ$ , 在通信距离确定的情况下, 根据  $\triangle BCP$  中的有关参数, 可以估算出散射公共体积中心到地面的距离, 即图中从 E 点到 C 点的高度。仍以通信距离  $d=300km$  为例, 当  $\phi=1^\circ$  时, 可以估算出, 散射公共体积

中心的高度大约为 4.4km; 而当  $\phi=2^\circ$  时, 散射公共体积中心的高度大约为 7km。对于国产 T-6 无人机而言, 后一高度已超过其实用升限。

## 2 散射公共体积尺寸的估算

散射公共体积尺寸的大小决定了无人机在公共体积中活动范围的大小。如果公共体积尺寸太小, 使得无人机在公共体积中巡航时没有足够的时间实施侦察和干扰, 这样就失去了实用意义。因此, 对公共体积尺寸进行估算是必要的。

下面按散射天线仰角为  $0^\circ$  的情况估算。图 2 为沿收发波束中心线而与地面垂直的剖面图。图中 P 点为收发波束中心线的交点, 收发波束宽度为  $\beta_0$ , CEDF 为公共体积的垂直剖面图, CD 为公共体积自身的最大高度, EF 为公共体积在平行于 AB 直线方向上的最大长度。

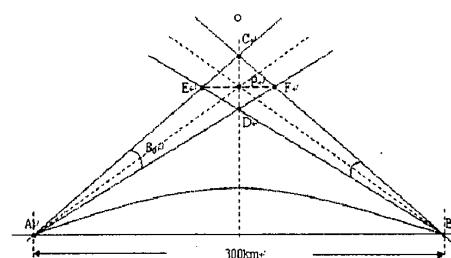
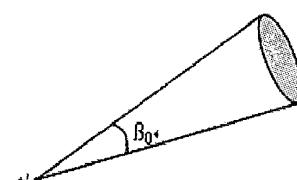
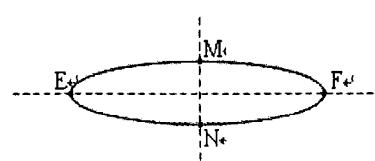


图 2 散射公共体积剖面图

假设主瓣波束具有图 3(a) 所示的圆锥形, 并且收发波束具有相同的宽度。在图 2 中过 EF 作一与地面平行的平面。



(a)



(b)

图 3 公共体积尺寸示意图

则公共体积在此平面内的轨迹为一椭圆, 如

图 3(b)所示, EF 为椭圆的长轴, MN 为椭圆的短轴。此椭圆的大小决定了无人机在公共体积水平面内的最大活动范围。

公共体积尺寸的大小与通信距离和主瓣波束的宽度有关。在此, 取 AB 两站之间的通信距离为  $d=300\text{km}$ 。散射通信天线的波束宽度  $\beta_0$  一般在  $1^\circ$  左右 ( $D=3\text{m}$  天线的波束宽度大约为  $1.2^\circ$ ,  $D=4.5\text{m}$  天线的波束宽度大约为  $0.8^\circ$ )。由于公共体积尺寸的计算比较繁琐, 下面只给出  $\beta_0$  取不同值时的估算结果, 如表 2 所示。

**表 2 公共体积尺寸的大小与通信距离和主瓣波束的关系 ( $d=300\text{km}$ )**

尺寸内容 尺寸(km) $\beta_0$	CD	EF	MN
$0.8^\circ$	2.10	100.2	2.10
$1.0^\circ$	2.62	125.0	2.62
$1.2^\circ$	3.13	149.4	3.13

由表 2 可以看出, 当通信距离为  $300\text{km}$  时, 假设散射天线波束宽度在  $\beta_0=0.8^\circ \sim 1.2^\circ$  范围内, 散射公共体积自身高度大约在  $2.1 \sim 3.1\text{km}$  范围内变化; 在水平面内, 公共体积沿通信方向的最大变化范围大约为  $100 \sim 150\text{km}$ , 在垂直通信方向上的最大变化范围大约为  $2.1 \sim 3.1\text{km}$ 。以上也是无人机在公共体积内的最大活动范围。无人机的平飞速度大约每小时几十到一百多公里, 因此, 只要无人机在上述范围内巡航, 会有足够的时间实施侦察和干扰。

当散射天线仰角增大时, 根据图 2 中的几何关系可以看出, 散射公共体积自身高度会有所增加, 而公共体积沿通信方向的最大变化范围会有所减小。但是, 由于天线仰角变化很小, 上述尺寸也不会变化太大。

### 3 干扰功率估算

当通信距离为  $300\text{km}$  时, 无人机欲在散射公共体积内巡航, 其升空高度随散射天线仰角的不同而变化, 天线仰角越大, 需要的升空高度越高。因为干扰需在视线距离范围之内, 无人机升空高度越低, 无人机覆盖的视距范围越小, 允许无人机的活动范围也越小。因此, 应考虑最不利的情况, 即在散射天线仰角为  $0^\circ$  时估算视线距离和需要的干扰功率。此时无人机升空度为  $h_2=$

$1770\text{m}$ , 假设通信天线的高度为  $h_1=3\text{m}$ , 在考虑大气折射情况下, 其视线距离为:

$$r = 4.12 \times [\sqrt{h_1(m)} + \sqrt{h_2(m)}] = 4.12 \times [\sqrt{3} + \sqrt{1770}] = 180.5 \quad (\text{km})$$

受视线距离的约束, 无人机离散射站的最大距离不超过  $180.5\text{km}$ , 这样, 无人机在 A、B 两站中间上空沿通信方向允许的飞行距离大约为  $61\text{km}$ 。在此范围内巡航, A、B 两散射站都处于无人机的视距范围之内, 并且无人机也处在散射公共体积的范围内。实际应用中, 无人机应尽量减小巡航范围, 以远离任一散射站。假设无人机在 A、B 两站中间上空沿通信方向的飞行距离为  $20\text{km}$ , 在垂直通信方向上的飞行距离为  $2 \sim 3\text{km}$ , 即无人机在散射公共体积的范围内沿狭长的椭圆轨迹巡航, 在通信距离为  $300\text{km}$  时, 根据前面的估算结果, 无人机到散射站的最大距离和系统总损耗分别为:  $d_J=160\text{km}$ ,  $L_{\Sigma J}=153.4\text{dB}$ 。

按照干扰有效压制信号的条件, 需要的干扰功率为:

$$P_j \geq L_{\Sigma J} + P_{rs} - G_J - G_{rJ}$$

为了使估算具有更高的可靠性,  $P_{rs}$  应取高的接收信号电平。根据前面的估算结果, 第四种情况(即  $P_t=2 \times 6.6\text{kw}$ ,  $d=300\text{km}$ )需要的干扰功率最大, 故取  $P_{rs}=-79\text{dBm}$ 。假设无人机上采用无方向性天线,  $G_J=0\text{dB}$ 。在第四种情况下, 散射天线增益为  $G_r=G_{rJ}=45\text{dB}$ , 考虑到无人机很难准确的在散射接收天线的最大方向上, 取  $G_{rJ}=42\text{dB}$ 。将各数值代入  $P_j$  的计算式, 得到:

$$P_j \geq 153.4 - 79 - 0 - 42 = 32.4 \quad (\text{dBm})$$

$P_j$  值用  $w$  表示, 则为  $P_j \geq 1.7w$ 。对于其他三种情况, 用同样的方法可以计算出需要的最小干扰功率都不到  $1w$ 。

估算结果表明, 即使无人机采用无方向性天线, 有效压制散射通信需要的干扰功率, 大多数情况下不到  $1w$ 。这对于减小干扰设备体积、重量, 进而减小无人机的尺寸和载荷量是十分有利的。

### 4 结论

a) 无人机巡航于散射公共体积内, 采用无方向性天线, 对通信距离为  $100 \sim 300\text{km}$  的散射通信实施侦察干扰, 在技术上是可行的。实施干扰时, 需要的干扰功率很小, 约在  $1w$  上下, 大多数情况下不到  $1w$ 。但是, 无人机的活动范围受到散射公共体积范围和视距范围的限制。另外, 要求无人机具有是否处于公共体积内的判别功能。

b) 要求遥控台具有升空功能。当遥控距离超

过视线距离时，需要进行升空遥控。

c) 当散射通信距离为 100~300km 时，无人机进入散射公共体积的升空高度随通信距离和散射天线的仰角而变化。当升空高度很低时，无

人机易于被敌方发现而使其生存危险性增加，在战术应用上受到限制。由于干扰功率小，宜采用小型无人机，以减小其被发现的概率。

**参考资料：**[1] 王友村等. 抗干扰通信技术. 重庆. 重庆通信学院. 1979.9

[2] 林象平编. 电子对抗原理. 北京. 国防工业出版社. 1982.1

[3] 温鸿鹏. 军用移动通信系统综合性能评估. 武汉. 通信指挥学院. 2000.4

[4] 王祖平. 战术通信概论. 武汉. 通信指挥学院. 1999.4

[5] Michel Jeruchim, Philip Balaban, K. Sam Shangmugan. Simulation of Communication Systems [M]. New York & London. Plenum Press. 1992

**作者：**

全德臣，工程师，山东郓城人，长期从事炮兵装备方面的管理工作；

陈治平，教授，安徽太和人，留俄罗斯访问学者，研究生导师。

## 穿墙生命探测雷达强回波对消最优搜索算法研究

叶结松 陈治平 朱岳超 全德臣

解放军炮兵学院一系，安徽省合肥市黄山路 451 号，230037

**摘要：**在军事领域和民用领域里，穿墙生命探测雷达具有重要作用，而强回波对消是穿墙探测技术中的关键性难题，本文设计了自动强回波对消系统，建立了最优搜索算法模型，实现了较优的强回波对消。

**关键词：**穿墙生命探测雷达 强回波对消 最优搜索算法

## 1、引言

穿墙探测（Through-the-Wall Surveillance, TWS）是一种研究以非接触方式穿透墙壁等不透明障碍物并获取障碍物后各种信息的探测技术。该技术综合采用了微波雷达技术、噪声抑制技术、信号处理技术、生物医学技术等多种先进技术，可以克服传统光电探测设备只能完成通视条件下探测应用的不足。通过雷达发射一束电磁波穿透不透明障碍物后照射生命体，并从反射回波中提取出生命体的呼吸、心跳等微动信息，具有高分辨率的 TWS 雷达甚至还可以在屏幕上显示出障碍物后场景的一个虚拟影像。

基于 TWS 技术的雷达具有探测距离远、穿透能力强、探测信息丰富、灵敏度高、装备体积小、重量轻、携带方便等方面，并且还可以采用先进的信号处理技术，从而进一步提高装备的探测可靠性和准确性。但由于该雷达系统以非接触方式获取墙壁等不透明障碍物后生命体微动信息，工作过程中，墙壁等静止背景反射回波非常强烈，经过墙壁多次衰减后的目标反射回波极其

微弱。为了保证接收系统正常工作，必须首先消去强烈回波信号，而强回波对消是穿墙探测技术中的关键性难题，制约着其性能指标的提高。

## 2、基本概念

### 2.1 对消基本思想

根据相关理论，连续波的波形可用一矢量进行描述，那么对消的基本思想，就是要产生一个与原矢量大小相同、方向相反的对消矢量，二者相加后就可以达到对消的目的。

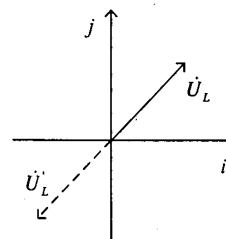


图 1 回波对消基本思想示意图

如图 1 所示，假设在矢量空间中有一矢量

## 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，一直致力于专注于微波、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>