

## 【海军】地效反舰飞弹的原理

2017-05-16 07:12:00

原文网址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/108908813>

美国的《Popular Mechanics》杂志在五月4日刊出一篇文章（参见<http://www.popularmechanics.com/military/weapons/a26382/china-sea-skimming-anti-ship-drone/>），讨论了最近泄露的一张据称是共军新式地效反舰飞弹的照片。五天后，《观察家》登出了一篇评论（参见[http://www.guancha.cn/military-affairs/2017\\_05\\_09\\_407411.shtml](http://www.guancha.cn/military-affairs/2017_05_09_407411.shtml)），反驳了美国人的一些论点。但是就如同前文《共军的超级大炮》一样，中美两边的评论员都没有说到症结，所以我在此做个澄清。



这是引起评论的那张照片。从这个角度，并不能确定机翼的翼展。从弹头上的空速管可以看出它还在早期测试的阶段。

如同上次一样，美国人有些十分离谱的论点，似乎是直接抄录中国军事论坛上的胡猜。他说这枚地效反舰飞弹的飞行高度只有18英寸，亦即半公尺左右；这代表着只有在0级和1级海况下，这枚地效反舰飞弹才能作战。换句话说，在西太平洋，99%以上的日子都不能使用，这当然是个大笑话。

在冷战期间，苏联在里海实验了几个不同型号的地效飞行器，最大的一个，外号叫“里海怪物”，长92米，翼展37米，重达500吨，但是即使在里海这样风平浪静的内海，原型机还是因为大浪而损毁。正因为地效飞行器的抗损性太差，苏联认为它作为登陆艇没有实用价值，转而开发同样吨位的气垫船，也就是后来的野牛级。



共军现役的YJ-62飞弹，助推火箭才刚引燃。它被设计来全程以500+节飞行，所以翼展只有2.9米。

传统的地效飞行器的飞行高度与翼展成正比；既然照片里说它“载荷重量大”，那么这枚新飞弹应该不小于共军现役的重型反舰飞弹YJ-62，也就是至少7米长。它的翼展从侧面角度的这张照片很难确定，就算比长度还大，也不太可能超过10公尺。里海怪物的翼展比它大了近4倍，飞行高度也就高了接近4倍，还因为不耐风浪而不能实用化，所以这枚地效反舰飞弹必然不可能只是一个传统的地效飞行器。

美国人说它的飞行速度是每小时600英里，亦即约530节，这比里海怪物的极速270节还要高出一倍。YJ-62的速度是600节，反而和它相似。那么问题就来了，速度和载重都和已经快淘汰的现役装备差不多，尺寸却宽大了许多，很难塞进发射筒里，为什么还要开发呢？美国人就因此很高兴地做了结论，这枚飞弹唯一的好处就在于飞得比YJ-62更低，但是美军航母战斗群的E-2D预警机就是专门设计来探测低空目标的，就算飞行高度只有18英寸，一样能在215英里（344公里）外侦测到，其后的成功拦截是例行而且必然的。

对于上面这一论点，《观察者》的文章针锋相对地说，他们刚好最近才采访了该导弹方案的航天科技集团某研究院负责人，一方面证实了照片的真实性，另一方面却宣称“这种导弹的设计目标主要就是突破E-2D预警机和标准6导弹的拦截”。这当然是很奇怪的：《观察者》说这型飞弹的飞行高度是6米，虽然比18英寸合理的多，但是与YJ-62的10米飞行高度更没有根本上的差别，它的翼展又比YJ-62大得多，外形也完全没有隐身处理，怎么可能会有更小的雷达截面呢？

《观察者》的文章还说这枚飞弹的飞行速度是每小时965公里，这刚好是600英里，所以应该是沿用美国人的说法。然后文章基本上一再重复说它有神奇的隐身能力，而这个能力就来自于飞行高度降低了4米。那么问题又来了，YJ-62降到6米的飞行高度并没有技术困难，主要只是为了避免风浪才设定到10米的高度，为什么不干脆只把YJ-62的进气口改到上面以避免进水就成了呢？

要解答以上这些谜题，必须对雷达和地效飞行器的原理做比较深入的分析。我们先从雷达谈起。

地面和军舰上的防空雷达，一般是直接往上看，没有什么背景杂波的问题，但是受地球曲率限制，对巡航导弹这类低飞的目标，探测距离非常有限。所以上个月美军用战斧导弹攻击叙利亚的空军基地，俄军的S400防空系统虽然也在叙利亚，却根本看不到也打不着。当时我评论说，能对抗巡航导弹的，只有以先进预警机为核心的完整防空体系。上周俄军就赶紧亡羊补牢，派了一架预警机进驻叙利亚。

但是预警机固然居高临下，不受地球曲率阻挡，地面和海面背景却都会产生大量的回波，即使有现代的高速计算机，也不可能准确地完全过滤掉。E-2D作为一种舰载机，在尺寸和载重上更有额

外的严格限制，别说不能用上共军KJ-500那样的三面阵列，连一面L波段的AESA阵列都载不动，为了维持足够的探测距离和反隐身能力，只好进一步牺牲解析度，而选用波长更长的UHF波段。但是如此一来，E-2D对背景杂波，就比战机上的X波段阵列还要敏感得多。

其实这基本上就是如何让雷达具有下视能力的问题，1960年代美军的解决方案是利用多普勒效应：当雷达波碰到目标反弹时，如果目标正在向雷达波源飞近，雷达反射波的频率会变高；反之，如果目标正在远离，反射波的频率会降低。既然一般的地面/海面背景（如车辆、飞鸟、风吹的树叶和波浪等等）的速度都很有限，只要专注在频率变化了很大的信号上，就自然把背景杂波通通过滤掉了。这个简单粗暴的办法，至今仍是机载防空雷达下视能力的基础。

但是这个办法（叫做Pulse-Doppler Radar，脉冲-多普勒雷达，不能用连续波，必须用脉冲才能精确测距）有一个先天上的缺点，就是只能侦测到有足够径向（直面或直背）速度的目标，所以躲避敌机探测的一个基本战术，就是绕着它转个大圈，那么速度主要成为切向（侧面），自己会被敌机雷达因径向速度不足而直接过滤掉，从它的荧幕上消失。

E-2D的UHF阵列，天生就对传统的隐身外形有若干克制能力（这也是为什么共军一直没有开发像美军AGM-129那类的隐身导弹的原因），但是对背景杂波很敏感，必须依靠多普勒原理在频率上做严格的限制。它对径向速度的侦测下限是个大机密，但是我认为不可能低于200节，有可能高达300节。这在实战中，一般并不成问题：一方面它的探测距离远，对方的战机和导弹如果老是绕圈子，还没有飞进防御核心油料就用完了；另一方面，飞行器的升力，也就是载重能力，随速度的降低而很快减小，一般的军机和飞弹都必须至少以高次音速（即上面美国人猜测的530节，这是马赫0.8）飞行，才能轻松携带足够威胁大型战舰的弹药和燃料。

所以要对E-2D隐身，有一个很简单的办法，就是以慢打快。只要把飞行速度降低到明显低于200节的地步，即使直对着E-2D飞去，它的AN/APY-9雷达仍然只能是睁眼瞎子。这里我猜测一些参数，然后看看它们是否合理。假设这枚飞弹全重2.5吨（YJ-62重1.4吨；我估算的是最终实用型的尺寸，目前的技术验证机可能小很多），全长9米，翼展8米，巡航速度140节，最大速度530节，动力来源是一座小型涡扇发动机。我们可以拿一架小喷气机来比较，例如Honda Jet，最大重量4.8吨，全长13米，翼展12米，巡航速度370节，最大速度440节，装备了两个一吨级推力的涡扇发动机。可以看出这枚飞弹除了巡航速度特别低之外，基本上就是Honda Jet一半大的一架中规中矩的喷气机。

那么怎么让飞机的巡航速度降下来呢？必须找到额外的升力来源，而地面效应就正是一个很好的额外升力来源。所谓地面效应，就是当飞机的飞行高度等于或低于翼展的时候，地面与机翼之间会形成一个高压气垫，因而给予飞机额外的升力。地面效应并不是地效飞行器的特权，一般民用飞机在降落的过程中，都会运用地面效应，先在跑道上空几公尺拉平，慢慢让空气阻力减低航速，然后平稳地轻轻触地。所以一架飞机在地面效应下的巡航速度，就是它的正规降落速度（严格来说，是稍高于正规降落速度，一方面这是因为降落时油料已经用得差不多，所以重量减轻了；另一方面降落时会放下襟翼），而远低于空中的巡航速度，例如Honda Jet的正规降落速度就是115节。所谓的地效飞行器，指的是不能在地面效应以外的空中正常飞行的飞机，换句话说，它们的极速很低，只比地效巡航速度高一点，例如前面提到的里海怪物，地效巡航速度是230节，极速却只有270节。

总之，这枚地效反舰飞弹其实并不是地效飞行器，而是一架小型无人机，正常的高空巡航速度可能在450节左右，但是它的机翼和下机身被针对地面效应而优化了，可以平稳地以140节的地效巡航速度飞行三个、甚至四个小时以上。如果海面平静，那么就依6米高度飞行；如果风浪大，则可以升到10米，增加航速到略低于200节以弥补升力。在最后几公里，再以最大速度冲刺（有可能类似YJ-18，即抛弃机翼和涡喷发动机，以火箭发动机进行短程超音速飞行），以减低被近迫防御系统拦截的机率。

论证完毕，我在此藉机闲扯一段有关140节空速的陈年往事。1991年，我还在哈佛博士班，同时也抽空开小飞机。那时我常租的小飞机是Cessna 172，它是最容易开的入门机，但是速度很慢。有一天，我从波士顿往西飞，到了麻省中部，这里刚好有一个大机场，叫Bradley International Airport，是康州首府Hartford和麻省的Springfield市共用的国际机场。小飞机一般没事不会到国际机场去找麻烦，但是那天我兴致来了，看到好像没有什么班机在排队起降，就请求降落。机场管制员一开始也不在意，把跑道方位给了我，叫我按照例行方案进场。于是我慢慢地转入Downwind Leg，然后发现这个跑道比我习惯的长了很多，飘了半天才准备要左转进入Base Leg，忽然机场管制员发声道，你有一架波音737排在你后面，请提醒我你们Cessna 172的降落速度是多少。我说是70节，他说737的降落速度是140节，你看着办吧。我的副驾驶是哈佛物理系的美国同学，他说机场管制员是在暗示我们必须加速，但是又不愿意明白叫我们违反驾驶常规，否则要是出了事他会有法律责任。我说我不在乎自己负责，就呼叫机场管制员，说我请求以极速降落，他马上准了。Cessna 172的极速是多少呢？不多不少，就正是140节。那是我唯一一次驾机在真正的（即常有民航班机来往的）国际机场降落，也是唯一一次高速降落（襟翼到即将落地才放下），而且后面还有一架737追来，刺激十足。

【后注】有老同学写电子信件来更正，Bradley那个经验并不是我唯一一次驾机在国际机场降落，他晚一年来波士顿找我玩的时候，我带他飞到Portland International Airport（缅因州的小Portland，不是Oregon州的Portland）降落吃饭。那次的降落也很刺激：我们在巡航高度已经快到机场正上空了，机场管制员却叫我跳过一般的Pattern，直接落地，所以我关掉油门，做了一个急转弯侧俯衝，就像二战的战斗机脱离编队准备俯衝扫射一样（那个动作叫做“Skid”，我的乘客或许觉得惊心动魄，其实它是个很安全的基本技术，是小飞机必须很快降低高度时的标准程序）。他记得我的地效拉平没做好，飞机在跑道上蹦了一下，这点我倒不记得，哈哈。不过Portland没有什么交通，不像Bradley那样有民航班机来给真正的压力；正因为它的国际机场名头有点名不符实，所以早先忘了提。

---

## 16 条留言

南山卧虫

2017-05-16 00:00:00

//1960年代美军的解决方案是利用多普勒效应：当雷达波碰到目标反弹时，如果目标正在向雷达波源飞近，雷达反射波的频率会变高；反之，如果目标正在远离，反射波的频率会降低//

天体物理学知识已经落下多年，若我没有记错，天文观察上有个“红移”和“蓝移”效应，原理与此相近。

举此一例，是顺便呼应一下，即使是在常人眼中高来高去的天体物理学/高能物理学，亦有缓急轻重之分。例如，这一项研究就很有实用价值，即使砸大钱进去也值得；至于之前所述超弦学/对撞机之类，砸了天量的银子进去，即使找到“圣杯”，亦是得物无所用。

又，王兄的科普很精彩，将几个问题的关键（预警机破解来袭飞弹的原理/以往飞弹规避预警机的方法/现在飞弹提升规避效率的可能方法），写得条理分明，言简意赅，下大功夫了。

“

我想超弦的问题在于，不论你投资多少，得到的只是一堆假话。科学是求真的学术，实用价值倒是次要的（公家的投资却应该专注在实用价值上）。

大家能看懂，我很高兴。

科普写得精采，写被737追，也很精采，这段我还看了两遍。孟源每篇文章都值得好好拜读，受益良多。之前提过写书的事，进度如何？迫不及待想买，想珍藏，想送人啊！至少我三个孩子，一人要有一本。

“

一年多来，家事分心，倒没有再想出书的事。

我自己回想起当年年少轻狂的日子，恍如隔世。

crimson1101

2017-05-16 00:00:00

Can you design this to carry a torpedo instead? or would that be impractical? Sounds like it's got heavy payload.

“

Theoretically, yes; practically, probably not.

Active sonar homing has very limited ranges. If the missile drops the torpedo payload as soon as it pops up above the horizon, the distance is still some 30 km, and yet there is no submarine to provide intermediate guidance. If it waits until the last 10 km, it is already halfway through the close defense zone and flying at max speed. Dropping a torpedo into water will be quite risky and not very rewarding.

yulan

2017-05-16 00:00:00

先生好！您提到的2篇报导先前都曾看过了，但都不知所以然，直到看了先生写的这篇才恍然大悟！这大概就是老祖宗常讲的：开窍了！在错综复杂的资讯中爬梳剔抉出重点，又能言简意赅让人开窍，显然是先生的长才！我能想像在求学生涯中若能遇见这样的导师，是多么幸福的事。想就教先生一件题外事，看您部落格1年来一直想问的问题：作为一个家长，如何训练孩子或教导孩子让他们有敏锐的思维？或者该具备甚么样的条件才能让孩子自己快点开窍，领悟真道理？感谢！

“

世事看得太清，不但挡自己的财路，而且永远都面对着失望与孤独。Ignorance is a bliss，无知就是欢乐，你确定你愿意让你的子女失去这个自我感觉良好的欢乐吗？

我自己的儿子，只要是我说的，就听不进去，连中文这种课题都拿他的老师来压我，虽然他明明知道他那个犹太裔的中文老师基本上每周都有问题拿来向我求教。

两年前，杨世光请我上电视，我事后特别感激。倒不是因为那满足了我的虚荣，而是因为我儿子从此不再确定我只是一个胡吹大气的家庭主夫。

逻辑能力是很难教的。你可以试试让他们参加辩论社，至少能引发一些兴趣。

mr edwin

2017-05-16 00:00:00

观察者网军事栏目的水平确实下降的很厉害，这最近几篇军事栏文章多半不得要点，内容肤浅。我看看主要作者，发现多半都是新面孔，连编辑都换了。后来我自己了解了一些信息，发现前观察者网的军事栏部分作者和编辑在一个网名叫yankeesama的老兄的领导下自己合伙搞了一个军事类短视频，叫帧察，您有兴趣也可以看看，其质量非常高，对一些消息的掌握和分析比cjdbby这些论坛要严谨的多。

“

Yankee已经换了好几个窝了，他的水准相当不错的，可是喜欢做视频而不是写文章。我个人觉得还是文字讨论比较严谨些。

//there is no submarine to provide intermediate guidance//

若提供 guidance 还有其他手段如该地效应机或其他飞行器、卫星甚至是反舰飞弹的话, 感觉上 torpedo payload 还是有些可能的应用场域?

“

电磁波在海水里衰减很快, 鱼雷只能綫导。

世界对白

2017-05-17 00:00:00

转吧友提问: 想问一下王先生, 美国的最新亚音速反舰导弹是不是也是为了不被舰载预警机发现, 还是因为其他原因才亚音速的?

“

不是, 它们是高次音速飞弹, 航速600节。

美国不搞超音速反舰飞弹, 一是因为传统上没有技术储备, 二是因为他们偏重射程。

美国的反舰飞弹有隐身外形, 但是飞弹原本就比飞机小, 这些外形改动只对波长很短的X波段有较大的效果。共军似乎认为没有必要。

王博士你好

2017-05-17 00:00:00

债券通这是这几天人行出台的新政策  
我想跟人民币国际化有关  
请王博士能仔细分析  
会对人民币国际化有何帮助跟冲击  
还有很久没看到王博士对大陆金融问题  
有深入的文章了  
谢谢回文

“

留言放错地方了, 这是有关飞行器的文章。

金融自由化在过去两年暂缓, 债券通只是延续既有的建立海外人民币交易中心的政策, 两年前都已经详细讨论过了。

xut6688

2017-05-17 00:00:00

请教王先生。我记得反潜巡逻机主要靠雷达侦测潜艇的通气管。按照这篇文章的说法, 潜艇速度慢, 通气管目标小, 还有海面杂波, 长波长的雷达肯定发现不了。如果用超短波的X波段雷达, 那通气管如果做了隐形修形, 是不是也发现不了啊? 通气管做隐形修形难度应该不高吧?

“

这个问题又更复杂一点, 所以我在正文里没有提。

反潜机用的不是预警机的对空下视雷达, 而是对地雷达的一种, 一般是X波段, 软件则包含一种对静止目标的特别分析技术, 叫做合成孔径, 利用数学分析, 可以从雷达本身的运动, 对静止目标做不同角度的扫描, 能够达到信号的大幅增益。

海上的波浪永远在随机起伏, 潜艇的通气管是唯一(几乎)静止的目标, 所以在合成孔径的分析下, 十分醒目; 尤其是低海况背景下, 甚至会產生所谓的潜望镜波纹, 反潜雷达的软件也会特别对其识别。

总之, 现代柴油潜艇的通气管和潜望镜都已经尽量做小, 在不妨碍功能的前提下, 形状也已经为隐身优化, 但是一般仍然可以被反潜机在合理的距离外(探测距离视机型和海况而变, 确实的数据也是军事机密, 我估计是30公里以上)轻松侦测到。

"E-2D作为一种舰载机，在尺寸和载重上更有额外的严格限制，别说不能用上共军KJ-500那样的三面阵列，连一面L波段的AESA阵列都载不动，为了维持足够的探测距离和反隐身能力，只好进一步牺牲解析度，而选用波长更长的UHF波段。"

请教博主，不应该是发射的电波波长越长，需要天线尺寸越大么？

“

你想得细，很好。

天线罩的空间是固定的，波长越短，天线单元越小，但是阵列里的单元数就越多，所以重量随波长变化不大。L波段和S波段的阵列都是极重的，X波段稍微轻一点。

UHF的微波发生器和天线单元的原理和L波段以下的雷达是不一样的，不是单纯的放大，所以可以节省重量。

AN/APY-9的天线单元数也是机密，但是我估计为低于100个，所以它的解析度是非常差劲的，只适合做预警。为标准6这样的主动导弹做中段制导还勉强，半主动的标准2就绝对不行了。

至于国军的E-2T，根本就没有阵列，落后了两代，60年代的雷达+90年代的电子系统，那性能就不用提了。

tobinzt

2017-05-18 00:00:00

先生介绍合成孔径那一段我很有兴趣，之前多次听说，只是不知所云。大概三年前台湾中央大学有位研究合成孔径技术的教授跳槽到北京的中科院遥感所，这件事当时很轰动

“

合成孔径是针对地面固定目标，把机载雷达从不同位置照射所得的回波资料，用计算机合成起来，使得雷达的有效孔径（孔径=天线的尺寸）增加到几百米，甚至几千米。因为雷达信号的增益与有效孔径成正比，而探测距离与增益平方根成正比，所以合成孔径效果显著，是现代对地雷达必有的技术。

合成孔径雷达一般是侧视，也就是向飞行方向的两侧扫描。

美军最新的反潜机是P8，它上面的反潜雷达是AN/APY-10，是X波段的AESA，本身的性能就已经不错，加了合成孔径如虎添翼。

Stan The Man

2017-05-18 00:00:00

虽然离题，但不得不提一下美日对于中国科技突破上的判断总是有一厢情愿低看的倾向，近年来更有鸵鸟心态假装中国的发展成就不是现实，例如前几日在德国的Nürburgring Nordschleife由中国蔚来汽车的NIO EP9创下了最新的单圈纪录6:45.90，不但如此，这还是人类有史以来第一辆在性能上全面击败石化燃料车的电动车。为此，我特地去找了美日网民的评论观看，结果看到了满地的玻璃碎片，相较之下，欧洲媒体及欧洲网民的评论就公正客观多了，毕竟论玩车欧洲人的文化底蕴深，深知能在Nürburgring Nordschleife创下纪录的车种都不是泛泛之辈。而由这些小地方也能看出，为何欧洲在战略上会愿意抛弃成见选择跟中国合作了。

“

新霸主会先在新科技上展露头角。

欧洲核心的德法两国，文化成见很深，对中国称不上友善。法国的新总统似乎会比较亲中，Merkel应该在选举之后也会转向。

南山卧虫

2017-05-18 00:00:00

厉害！！

视频网址：<https://www.youtube.com/watch?v=c4MRydmz86E>

王兄若有空，不妨专题谈谈电动车？

“

我没有比一般评论者更深刻的见解。

lastman

2017-05-19 00:00:00

原来如此，谢谢博主，我原以为天线长度是那个蘑菇的大小。既然X band的单元很小，美军要想反制也很容易吧，做一个升级型号配备x band的unit不就行了？

“

X波段不适合做预警，回头看看我以前的文章吧。

mr edwin

2017-05-23 00:00:00

哈哈，今年的朱日和好看了。观网消息，2017年第一场由原38集团军113师改组而来的中部战区某顶级信息化合成旅对抗蓝军，这一仗真是要天昏地暗了。

“

这个留言可以放在以前有关朱日和的几篇文章下面，我一般仍会注意到旧文章的新留言。

朱日和不只是训练，更重要的是探索。2015年研究演习本身的最佳模式；2016年就是检验二線部队的战力，准备裁撤的清单；今年应该是验收军改第一阶段的成果，所以会有很多一流的部队上阵。

CRYTRADER

2018-07-08 20:55:00

又有新的消息，這次是俄羅斯方面放出來。透露的巡航高度數據比觀網說的6米要低不少。  
<https://www.toutiao.com/a6573944073437053448/> 利用地效原理贴近海面1米高度飞行，3吨最大起飞重量，弹头重达1吨。巡航飞行速度可达0.65马赫，也就是802公里/小时，续航时间1.5小时，可封锁海域半径300到600公里海域，巡航高度为1-6米。

返回索引页