

文章编号: 1001 - 893X(2011)04 - 0035 - 05

非等密度箔条走廊及其干扰效果的改善*

王洪迅¹, 叶广强¹, 王红卫¹, 乔庆刚²

(1. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038, 2. 陆军航空兵学院, 北京 101123)

摘要: 由于雷达电磁波倾斜照射, 箔条走廊等密度布设时, 其不同位置的压制系数并不相同。为此, 修正了箔条走廊的密度模型和衰减模型, 并通过仿真找出其中的量变关系和主要影响因子, 改变箔条走廊不同位置的箔条密度, 使得箔条走廊的压制系数基本相同。

关键词: 雷达对抗; 干扰走廊; 压制干扰; 箔条密度; 压制系数

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.04.008

Unequal Density Chaff Corridor and its Blanket Effect Upgrade

WANG Hong-xun¹, YE Guang-qiang¹, WANG Hong-wei¹, QIAO Qing-gang²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Army Aviation College, Beijing 101123, China)

Abstract: Due to radar's acclivitous radiating on chaff corridor, chaff corridor's blanket coefficient of different position is different in condition that chaff density is the same all over the corridor. To solve this problem, the density model and attenuating model are modified, and inherent quantitative relation and the key factor are found out by simulation. The blanket index of chaff corridor is unaltered by changing the corresponding positions' chaff density.

Key words: radar countermeasure; chaff corridor; jam ECM; chaff density; blanket index

1 引言

在大机群对预定目标进行突防攻击时, 常采用箔条走廊掩护攻击机群。由于箔条走廊制造简单、成本低、使用方便、通用性强, 因此目前仍然是突防的重要掩护手段之一。

目前许多文献对箔条干扰走廊的应用、提高其干扰效能进行了分析。文献[1-2]解释了箔条对雷达的干扰原理; 文献[3]研究了大气环境下箔条机械运动特性; 文献[4]介绍干扰走廊的一般原理与设计方法; 文献[5-8]从各种环境, 针对不同类型雷达讨论了干扰走廊的战术应用及效果; 文献[9-14]从干扰走廊对电磁波进行衰减的角度展开, 分析了箔条

干扰走廊对各种雷达的干扰效能。但是这些文献在对箔条走廊的研究中, 均存在一个相同的假设条件, 即箔条走廊处处均匀, 也就是箔条走廊的箔条密度处处相同。

但考虑到实际战术应用情况, 多数条件下雷达电磁波对于箔条干扰走廊是倾斜照射的。在前述假设条件下, 会对箔条干扰走廊的干扰效果造成显著的影响。本文从雷达电磁波倾斜照射这一实际条件出发, 修正了箔条干扰走廊对电磁波的作用模型。

2 传统箔条走廊分析

如图 1 所示, 为了掩护攻击飞机 T , 将大量具有一定长度和频率响应特性的箔条抛洒在空中形成箔

* 收稿日期: 2010-12-14; 修回日期: 2011-03-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA701403)

Foundation Item: The National High-tech R&D Program of China (863 Program)(No. 2006AA701403)

条走廊,从而遮蔽雷达 R 对 T 的探测。可以看出,雷达电磁波对于箔条干扰走廊是倾斜照射的。

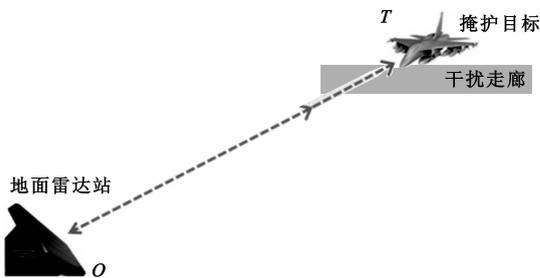


图1 普通箔条走廊干扰示意图

Fig.1 Common chaff corridor jamming sketch

对雷达而言,铺设箔条走廊后,传统上其接收信号有两种:一种是目标直接回波 P_{RTR} ,即目标直接反射雷达波所形成的回波信号,与目标特性有关;另外一种为箔条直接回波 P_{RCR} ,即箔条直接反射所形成的回波信号,与箔条特性有关。

由文献[1-2]可知,雷达接收的目标直接回波功率为

$$P_{RTR} = \frac{P_R G_R^2 \sigma_T \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{RT}^4} e^{-2n(0.17\lambda^2)h_c} \quad (1)$$

箔条直接回波功率为

$$P_{RCR} = \frac{P_R G_R^2 \sigma_C \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{RC}^4} \quad (2)$$

定义压制系数为 $k_{CT} = P_{RCR}/P_{RTR}$,式(1)和式(2)代入并化简可得:

$$k_{CT} = \frac{\sigma_C R_{RT}^4}{\sigma_T R_{RC}^4} e^{2n(0.17\lambda^2)h_c} \quad (3)$$

通常认为 $R_{RT} \approx R_{RC}$,因此:

$$k_{CT} = \frac{\sigma_C}{\sigma_T} e^{2n(0.17\lambda^2)h_c} \quad (4)$$

式中, P_R 为雷达辐射功率, G_R 为发射天线增益, σ_T 为目标截面积, R_{RT} 为目标 T 到雷达 R 的距离, R_{RC} 为箔条到雷达的距离; σ_C 、 σ_T 分别为箔条、目标有效反射面积, h_c 为箔条走廊厚度, n 为箔条走廊箔条密度。

3 雷达倾斜入射的影响

由于雷达电磁波倾斜入射,会对箔条云的两个参数产生影响,一个是箔条有效反射面积 σ_C ,另外一个为箔条云对雷达电磁波的衰减参数 $e^{-2n(0.17\lambda^2)h_c}$ 。

3.1 对箔条有效反射面积的影响

箔条有效反射面积 σ_C 一般定义为雷达分辨单元内箔条数量,雷达分辨单元一般与雷达波束方位角 ϕ 、俯仰角 φ 、距离 R 、脉冲宽度 W_{PW} 四个因素有关。由于雷达倾斜入射,雷达到箔条走廊不同位置的距离不同,因此箔条走廊上不同位置的有效反射面积 σ_C 也不尽相同。通常地面雷达脉宽 W_{PW} 数值相对较大,约为数十至几百微秒,对应距离为数百公里或数十公里,因此本文仿真中暂不考虑雷达波束的纵向距离分辨的限制。

如图2所示,设雷达坐标为 $(L, 0)$,其波束正对目标,其波束俯仰角为 θ ,箔条走廊从左至右,其入端(远离雷达端)坐标为 $(0, 0)$,出端(靠近雷达端)坐标为 $(x, 0)$,箔条走廊底层高度为 H ,厚度为 h_c ,目标坐标为 (x_T, y_T) 。

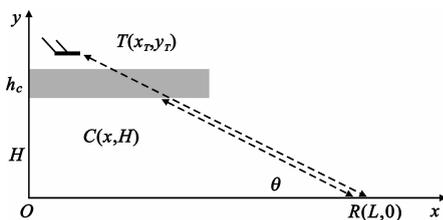


图2 箔条走廊干扰几何关系

Fig.2 Geometry in chaff corridor

根据几何关系可得:

$$\sigma_C = n(0.17\lambda^2) \cdot dv = n(0.17\lambda^2) \cdot \int \frac{\phi \varphi}{\sin\theta} dR \quad (5)$$

由于 $dR = \frac{dh}{\sin\theta}$, $\sin\theta = \frac{H}{R_{RC}}$,因此:

$$\sigma_C = n(0.17\lambda^2) \cdot \int_H^{H+h_c} \frac{\phi \varphi h}{\sin^2\theta} dh \quad (6)$$

解之可得:

$$\sigma_C = n(0.17\lambda^2) \cdot \frac{\phi \varphi R_{RC}^2}{2H^2} [(2H + h_c)h_c] \quad (7)$$

3.2 对箔条走廊衰减参数的影响

箔条走廊衰减参数为 $e^{-2n(0.17\lambda^2)h_c}$,这个结果实际上是在雷达电磁波垂直照射情况下的分析结果。当雷达电磁波为倾斜入射,雷达电磁波所经途径实际上并非干扰走廊的厚度,而是斜径 l (见图2)。根据几何关系,所经过的斜径长度为: $l = h_c/\sin\theta$ 。因此该衰减参数应修正为 $e^{-2n(0.17\lambda^2)\frac{h_c}{\sin\theta}}$ 。

4 公式修正与仿真

4.1 压制系数修正

综上所述,考虑雷达倾斜照射的情况下,压制系数应修正为

$$k_{CT} = \frac{n(0.17\lambda^2) \cdot \phi_C R_{RC}^2 [(2H + h_c) h_c]}{\sigma_T 2H^2} \cdot e^{\frac{2n(0.17\lambda^2) h_c}{\sin\theta}} \quad (8)$$

为便于分析,将压制系数归一化,采用相对压制系数。以箔条干扰走廊入端(远离雷达端)为参照,定义箔条走廊入端压制系数为

$$k_{CT0} = \frac{n_0(0.17\lambda^2) \cdot \phi_C R_{RC0}^2 [(2H + h_c) h_c]}{\sigma_{T0} 2H^2} \cdot e^{\frac{2n_0(0.17\lambda^2) h_c}{\sin\theta_0}} \quad (9)$$

定义归一化的相对压制系数为

$$\bar{k} = k_{CT} / k_{CT0} \quad (10)$$

解之可得:

$$\bar{k} = \frac{n}{n_0} \cdot \frac{R_{RC}^2}{R_{RC0}^2} \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_{T0}} e^{0.34(\frac{n}{\sin\theta} - \frac{n_0}{\sin\theta_0})\lambda^2 h_c} \quad (11)$$

考虑到 $\sin\theta = H/R_{RC}$, 并且只考虑箔条走廊的影响, $\sigma_T \approx \sigma_{T0}$, 则:

$$\bar{k} = \frac{n}{n_0} \cdot \frac{R_{RC}^2}{R_{RC0}^2} e^{0.34(nR_{RC} - n_0 R_{RC0})\frac{\lambda^2 h_c}{H}} \quad (12)$$

若令 $\begin{cases} k_1 = R_{RC}^2 / R_{RC0}^2 \\ k_2 = e^{0.34(nR_{RC} - n_0 R_{RC0})\frac{\lambda^2 h_c}{H}} \end{cases}$, 则:

$$\bar{k} = \frac{n}{n_0} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (13)$$

4.2 等密度箔条走廊压制效果

假设距雷达横坐标 $L = 100$ km, 从原点上方 $H = 6$ km 处开始布设箔条走廊, 对雷达进行压制干扰。当箔条走廊处处密度相等时, 仿真图形如图 3 和图 4 所示。其中图 3 为归一化压制系数量值随干扰走廊位置的变化, 图 4 为归一化压制系数按 dB 计算的结果。

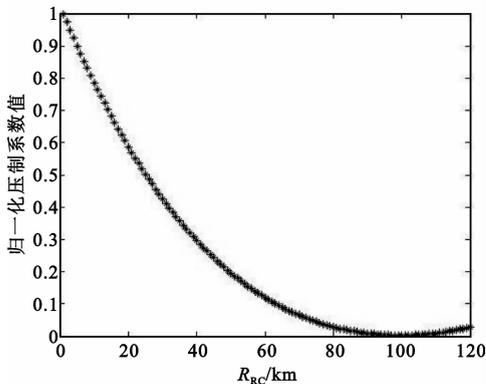


图 3 归一化压制系数量值变化示意图
Fig.3 Unitary blanket index linear curve

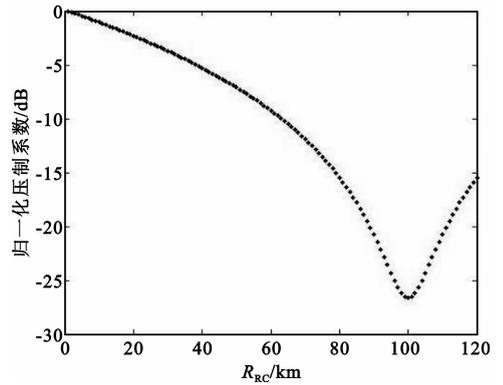


图 4 归一化压制系数指数变化示意图
Fig.4 Unitary blanket index exponential curve

显然,在干扰走廊处处等密度的前提下,随着箔条走廊向雷达的逼近,其归一化压制系数越来越小,仿真中当箔条走廊铺设经过雷达上方时,其归一化压制系数按 dB 计算降至 -26.66 dB。也就是说,箔条走廊距离雷达越近的地方,归一化压制系数越小,压制效果就越差。因此在铺设等密度箔条走廊时,若按靠近雷达最近的位置计算所需箔条数量,将造成箔条的极大浪费;而若按距离雷达最远的位置计算所需箔条数量,将可能达不到所需的压制效果。

4.3 一种非等密度箔条走廊压制效果

若要维持箔条走廊压制效果,需要维持整个走廊的压制系数基本不变,因此需要改变箔条走廊的厚度或者密度。一般情况下铺设箔条走廊的载机匀速飞行,改变走廊密度较为容易实现。

为了找出影响压制效果的主要因素,仍然假设箔条走廊处处等密度,长度为 80 km, 计算公式(13)及其中的平方项 k_1 和指数项 k_2 , 结果如图 5 所示。

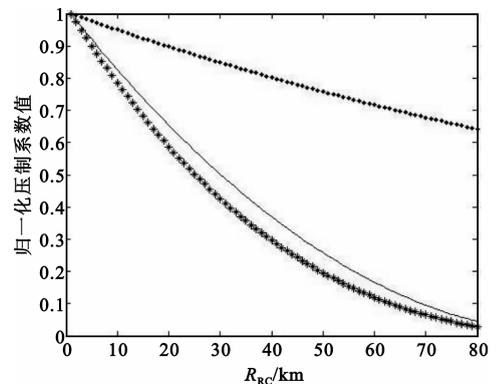


图 5 相对压制系数的量值变化
Fig.5 Blanket index's relative factor curves

图 5 中从上到下 3 条曲线分别为 k_2 、 k_1 、 \bar{k} 的变化情况。从图中可以看出,对归一化压制系数影响

最大的是平方项,因此若令箔条密度的变化为平方项的倒数将可能使归一化压制系数有较大的改善。根据几何关系可知:

$$n(x) = n_0 \frac{L^2 + H^2}{(L-x)^2 + H^2} = n_0 \frac{L^2 + H^2}{x^2 - 2xL + L^2 + H^2} \quad (14)$$

在题设条件下,箔条相对密度变化曲线如图6所示。

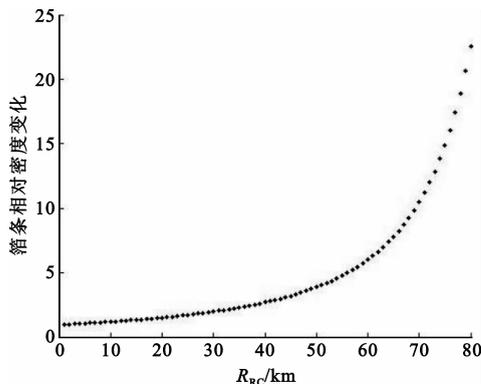


图6 改进的箔条密度变化曲线
Fig.6 Chaff density's curve of upgrade

按公式(14)控制箔条密度所形成的箔条走廊,其归一化压制系数如图7所示,可见整个箔条干扰走廊虽然各处的归一化压制系数仍然不同,但是其量值相对变化仅仅从1变化到1.25,而且是距离雷达越近,其压制效果也越好,比较图3而言有很大改善。

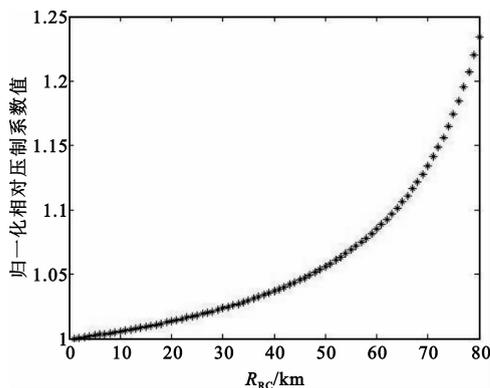


图7 改进箔条走廊归一化压制系数量值
Fig.7 Unitary blanket index curve of upgrade

5 结束语

影响箔条走廊压制效果的因素很多,如天气、风速、雷达频率特性、布阵情况等,箔条走廊布设时需

要对这些因素综合考量。本文从理论上指出密度对箔条走廊压制效果有很大的影响,传统的走廊布设方式会使得干扰走廊距离雷达越近,压制效果越差。通过改变箔条密度,并找到一个箔条密度变化曲线,可以达到既不浪费箔条又可维持箔条走廊压制效果的目的。对于从雷达旁侧铺设箔条走廊进行遮蔽干扰的情况也可进行类似分析,进而得出类似结果。对多部雷达进行压制干扰时,需要针对雷达的频段、位置、威力区域等,对相应频段箔条的密度按照上述方式区别分析。

参考文献:

- [1] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1985:121-122.
LIN Xiang-ping. Radar Countermeasure Theory[M]. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering College Press, 1985:121-122. (in Chinese)
- [2] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:371-378.
WANG Xing. Airborne Countermeasure Countermeasure Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:371-378. (in Chinese)
- [3] 蔡万勇,李侠,万山虎,等. 大气环境下箔条运动轨迹及箔条幕扩散模型[J]. 系统工程与电子技术,2009(3):565-569.
CAI Wan-yong, LI Xia, WAN Shan-hu, et al. Model of chaff motion trajectory and curtain wall diffusion in air environment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009(3):565-569. (in Chinese)
- [4] 孙伟通,姜峰. 无源干扰走廊研究[J]. 光电技术应用,2005(6):28-31.
SUN Wei-tong, JIANG Feng. Research on Jamming Corridor[J]. Electro-Optic Technology Application, 2005(6):28-31. (in Chinese)
- [5] 淦元柳. 干扰走廊现状与发展趋势[J]. 光电对抗与无源干扰,1999(4):1-3.
GAN Yuan-Liu. Actuality and Development of Jamming Corridor[J]. Electro-Optic & Passive Counter-Measure, 1999(4):1-3. (in Chinese)
- [6] 才干,张科,李言俊. 干扰走廊战术使用[J]. 火力与指挥控制,2008(7):46-47.
CAI Gan, ZHANG Ke, LI Yan-jun. Tactical Application Research of Chaff Corridor[J]. Fire Control & Command Control, 2008(7):46-47. (in Chinese)
- [7] 杨大海,马德宝,冯志红. 星载 SAR 箔条走廊干扰特性分析[J]. 电子对抗,2010(1):22-25.
YANG Da-hai, MA De-bao, FENG Zhi-hong. Chaff Corridor Interference Analysis of the Space-borne SAR[J].

- Electronic Warfare, 2010(1):22-25. (in Chinese)
- [8] 冯德军,王雪松,刘佳琪.箔条云对地基雷达干扰效果分析及其应用[J].现代雷达,2010(6):22-26.
FENG De-jun, WANG Xue-song, LIU Jia-qi. Jamming Effect Analysis of Chaff Cloud on Ground-based Radar and Its Application [J]. Modern Radar, 2010(6):22-26. (in Chinese)
- [9] 苏福,王小念,皮军明,等.干扰走廊对地面警戒雷达干扰效果仿真分析[J].火控雷达技术,2007(9):57-60.
SU Fu, WANG Xiao-nian, PI Jun-ming, et al. Simulation and Analysis of Jamming Effectiveness of Jamming Corridor on Ground Early Warning Radar [J]. Fire-Control Radar Technology, 2007(9):57-60. (in Chinese)
- [10] 陈静.干扰走廊的功能与雷达体制无关[J].光电技术应用,2005(8):38-42.
CHEN Jing. There is No Relationship between the function of Jamming Corridor and Radar System [J]. Electro-Optic Technology Application, 2005(8):38-42. (in Chinese)
- [11] 胡松,卢景双,徐铜.箔条压制性干扰对雷达信号衰减的效能评估[J].吉林大学学报(信息科学版),2008(5):259-263.
HU Song, LU Jing-shuang, XU Tong. Effect Evaluation of Chaff Suppress Jamming on Power Attenuation of Radar Signal [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2008(5):259-263. (in Chinese)
- [12] 胡松,卢景双,李彦志.箔条走廊掩护飞机编队突防作战效能评估[J].舰船电子对抗,2008(10):20-23.
HU Song, LU Jing-shuang, LI Yan-zhi. Evaluation of Operation Effectiveness of Chaff Corridor Covering Airplane Formation Penetration [J]. Shipboard Electroic Countermeasure, 2008(10):20-23. (in Chinese)
- [13] 卢景双,胡松,周瑞.箔条走廊对MTI雷达的干扰效能研究[J].舰船电子对抗,2009(8):31-33.

- LU Jing-shuang, HU Song, ZHOU Rui. Research into The Jamming Efficiency of Corridor Chaff to MTI Radar [J]. Shipboard Electroic Countermeasure, 2009(8):31-33. (in Chinese)
- [14] 张云飞,张考,何庆芝.箔条云对飞机隐身特性的影响分析与计算[J].航空学报,2000(3):202-205.
ZHANG Yun-fei, ZHANG Kao, HE Qing-zhi. Influence Analysis and Calculation of Chaff Corridor on The Stelth Performance of Aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000(3):202-205. (in Chinese)

作者简介:

王洪迅(1977—),男,河北吴桥人,2006年获博士学位,现为讲师,主要研究方向为电子对抗;

WANG Hong-xun was born in Wuqiao, Hebei Province, in 1977. He received the Ph.D. degree in 2006. He is now a lecturer. His research direction is electronic warfare.

Email: lunan2000@yeah.net

叶广强(1971—),男,山东青岛人,副教授,主要研究方向为电子对抗;

YE Guang-qiang was born in Qindao, Shandong Province, in 1971. He is now an associate professor. His research direction is electronic warfare.

王红卫(1974—),男,河南平顶山人,副教授,主要研究方向为电子对抗;

WANG Hong-wei was born in Pingdingshan, Henan Province, in 1974. He is now an associate professor. His research direction is electronic warfare.

乔庆刚(1965—),男,河南新乡人,高级工程师,主要研究方向为直升机航空仪电设备。

QIAO Qing-gang was born in Xinxiang, Henan Province, in 1965. He is now a senior engineer. His research direction is helicopter avionics and instrument.

恭喜刘伟成为本刊网站第3万位访问者

根据读者(访问者)提供的屏幕截图信息,本刊编辑部确认解放军63780部队刘伟为本刊网站第3万位访问者,在此向他表示祝贺。根据规定,他将获得本刊连续1年的免费赠阅(从本月起),以及年终的期刊精装合订本1套。如果编辑部还有其它奖励,届时会一并寄送。感谢该读者(访问者)对本刊的关注与支持。

《电讯技术》编辑部