

# 一种高效的有源照射箔条云复合干扰方法

李洋, 吴华, 王红卫, 程嗣怡

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要** 针对箔条自卫干扰对新体制雷达的干扰能力和效果不断下降的问题, 提出了一种复合干扰方法。该方法运用机载电子干扰设备接收并转发敌机载火控雷达或空空导弹制导导引头(以下简称敌方雷达)发射的信号, 经由载机的干扰发射天线照射到箔条云上, 箔条云对干扰信号二次辐射, 被敌方雷达接收, 形成假目标(不同于箔条云反射雷达信号形成的假目标), 起到诱骗干扰作用。仿真计算结果表明: 采用此复合干扰后, 敌方雷达接收到的箔条云有效反射面积比原来提高几十倍甚至几百倍以上, 从而缩短了箔条云的展开时间, 增大了压制比, 并验证了此方法的可行性, 提高了飞机的综合干扰能力, 具有较强的实用价值。

**关键词** 复合干扰; 雷达回波; 箔条云; 仿真

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.04.009

**中图分类号** TN972 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)04-0039-05

目前世界上现役主战飞机都装备有箔条干扰系统, 但箔条自卫干扰对新体制雷达的干扰能力和效果却在不断下降。多次试验表明, 箔条造成的干扰难以对机载火控雷达形成有效干扰能力<sup>[1]</sup>。其主要原因表现在两个方面: ①箔条弹投放后以一定的初始速度作向上抛物运动, 同时还将受到空中气流的影响, 因此在很短的时间内箔条云的运动速度将大幅度降低<sup>[2]</sup>; ②世界上现役主战飞机都装备脉冲多普勒雷达, 这种雷达具有脉冲雷达的距离分辨力和连续波雷达的速度分辨力。有更强的抑制杂波的能力, 因而能在较强的杂波背景中分辨出动目标回波<sup>[3]</sup>。基于以上原因, 在目标与箔条假目标两者中, 箔条假目标很快被识别并被敌方雷达抛掉。本文综合有源干扰和无源干扰的优点, 提出通过有源照射箔条云的复合干扰方案。

## 1 有源照射箔条云复合干扰原理

载机上的探测设备发现敌方雷达信号, 载机干扰设备立即发射箔条弹, 同时将接收到敌方雷达信号经过转发放大后, 通过干扰天线照射到箔条云上, 经过箔条云的二次散射, 被敌方雷达所接收。这样相当于在实际的箔条云和载机连线的反方向处有一个“假箔条云”<sup>[4]</sup>。有源照射箔条云复合干扰原理见图1。这时, 敌方雷达接收到的回波功率由以下4部分组成: ①被箔条云直接散射回去的雷达信号回波功率  $P_{TC}$ ; ②通过载机有源干扰转发放大敌方雷达信号后, 照射到箔条云上, 再经过箔条的二次散射的干扰信号功率  $P_{JC}$ ;

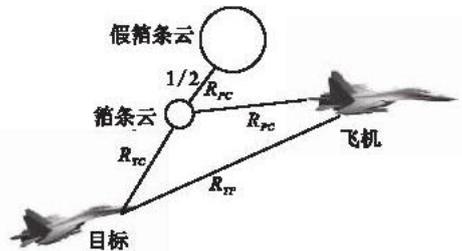


图1 有源照射箔条云复合干扰原理  
Fig. 1 Compound jamming method of the signal is irradiated on chaff cloud

\* 收稿日期: 2011-04-08

基金项目: 国防预研基金资助项目(9140C1005051103); 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201113Y01)

作者简介: 李洋(1983-), 男, 辽宁本溪人, 硕士生, 主要从事电子对抗理论与技术研究。

E-mail: 82504318@163.com

③载机本身反射雷达发射的信号功率  $P_p$ ; ④当敌方雷达与箔条云同在干扰机干扰波束内时, 敌方雷达接收到载机发出的干扰信号功率  $P_{JT}$ 。

通过复合干扰的实施, 敌方雷达多接收了  $P_{JC}$ 。这样就相当于增大了箔条云的散射面积。

## 2 复合干扰可行性分析

敌方雷达可以收到 4 种回波信号。这 4 种回波信号的延迟时间分别为(这里假定有源干扰从接收到敌方雷达信号到转发信号之间没有延迟):

1) 敌方雷达信号通过箔条云直接散射的回波信号延迟时间  $t_c = 2R_{TC}/c$ , 式中  $R_{TC}$  为箔条到飞机的距离,  $c$  为光速。

2) 敌方雷达信号通过载机有源干扰设备干扰调制或转发放大后, 照射到箔条云上, 再经过箔条云的二次散射的干扰信号延迟时间  $t_{jc}$  为:

$$t_{jc} = R_{TP} + R_{PC} + R_{TC}/c \quad (1)$$

式中:  $R_{TP}$  为敌方到载机的距离;  $R_{PC}$  为飞机到箔条的距离。由于  $R_{PC}$  相对  $R_{TP}$  和  $R_{TC}$  很小 ( $R_{PC}$  一般为十几 m 到几百 m, 而  $R_{TP}$  和  $R_{TC}$  一般为 100 km 以上<sup>[5]</sup>), 因此有:

$$R_{TP} \approx R_{TC} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$t_{jc} = 2R_{TP}/c \quad (3)$$

3) 载机本身反射雷达的回波信号延迟时间  $t_p$  为:  $t_p = 2R_{TP}/c$ 。

4) 当敌方雷达与箔条同在干扰机干扰波束内时敌方雷达接收到载机发出的干扰信号延迟时间  $t_j = \frac{2R_{TP}}{c}$ 。  $t_{jc}$  相对  $t_c$  延迟时间为:

$$t_{jc} - t_c = R_{TP} + R_{PC} + R_{TC}/c - 2R_{TC}/c = R_{PC} + R_{TP} - R_{TC}/c \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)得:  $t_{jc} - t_c = R_{PC}/c$ 。

这样相当于在实际的箔条云和载机连线的反方向  $R_{PC}/2c$  处有一个“假箔条云”(根据雷达测距原理求得)。因为现在的雷达距离分辨率一般在 300 m 左右<sup>[5]</sup>, 大于  $R_{PC}/2$ 。所以“假箔条云”与实际箔条云就被未制导雷达认定为一个目标。随着载机的机动, 箔条云与载机的距离逐渐增大。当这个距离超过敌方雷达的距离分辨率时, 根据雷达的跟踪原理, 敌方雷达转而跟踪“假箔条云”, 载机则脱离敌方雷达的跟踪<sup>[6]</sup>。

因此, 在刚投放箔条弹时“假箔条云”与实际箔条云同处敌方雷达分辨单元内。所接收到的回波功率则比没有使用有源复合干扰时大。回波功率与反射面积大小成正比, 所以使用有源复合干扰提高了箔条的有效反射面积。载机距箔条云较近, 刚投放时大约 30 m<sup>[7]</sup>, 而敌方雷达距箔条云较远, 有几十 km 或 100 多 km。所以容易做到使敌方雷达接收到“假箔条云”的回波功率比实际的功率大, 大的倍数就是有效反射面积提高的倍数。

## 3 复合干扰建模

敌方雷达可以收到 4 种回波信号, 这 4 种回波信号的功率分别为:

1) 敌方雷达所接收到的被箔条云直接散射回去的回波信号功率  $P_{TC}$ 。

箔条云直接接收到敌方雷达发射的信号功率为:

$$P_{C1} = P_T G_T \sigma_c / 4\pi R_{TC}^2 \quad (5)$$

式中  $\sigma_c$  为箔条云相对于敌方雷达方向的有效反射面积。

箔条云将接收到的信号功率部分反射到空间, 反射系数为  $\eta$ ,  $0 < \eta < 1$ 。其反射功率以球面波向四周传播, 它反射到敌方雷达上的功率为:

$$P_{TC} = P_{C1} \eta A_T / 4\pi R_{TC}^2 = P_T G_T^2 \lambda^2 \sigma_c \eta / (4\pi)^3 R_{TC}^4 \quad (6)$$

式中:  $P_T$  为敌方雷达的发射功率;  $G_T$  为敌方雷达的天线增益;  $\lambda$  为敌方雷达所用波长。

2) 雷达发射的电磁波通过有源干扰转发放大后, 照射到箔条云上, 再经过箔条云二次散射的干扰功率

$P_{JC}$ 。

载机的干扰发射功率为:

$$P_J = KP_{TJ} = K P_T G_T G_{J1} \lambda^2 \gamma_1 / (4\pi)^2 R_{TP}^2 \quad (7)$$

式中: $K$ 为有源干扰微波放大器的功率放大倍数; $G_{J1}$ 为箔条云在有源干扰辐射方向上的发射天线增益; $\sigma_J = \frac{\lambda^2 G_{J1}}{4\pi}$ 为干扰吊舱在敌方雷达方向上的有效接收面积; $\gamma_1$ 为载机有源干扰设备的发射天线极化失配系数; $P_{TJ}$ 为载机有源干扰设备接收天线接收到的敌方雷达发射功率。

箔条云接收到载机有源干扰发射的信号功率  $P_{C2}$  为:

$$P_{C2} = P_J G_J \sigma_c / 4\pi R_{JC}^2 \quad (8)$$

则  $P_{JC}$  为:

$$P_{JC} = P_{C2} \eta A_T \gamma_2 / 4\pi R_{TC}^2 \quad (9)$$

式中  $\gamma_2$  为敌方雷达接收天线的极化失配系数。

将式(7)代入式(8)、式(8)代入式(9)得:

$$P_{JC} = K \frac{P_T G_T^2 G_J G_{J1} \gamma_1 \gamma_2 \lambda^4 \sigma_c \eta}{(4\pi)^5 R_{TP}^2 R_{PC}^2 R_{TC}^2}$$

式中: $G_J$ 为有源干扰的发射天线增益; $\sigma_p$ 为飞机的反射面积。

$$3) \text{ 载机本身反射雷达的回波信号功率 } P_p \text{ 为: } P_p = \frac{P_T G_T^2 \lambda^2 \sigma_p}{(4\pi)^3 R_{TP}^4}$$

$$4) \text{ 敌方雷达接收到载机发出的干扰信号功率 } P_{JT} \text{ 为: } P_{JT} = \frac{P_J G_J A_T}{4\pi R_{TP}^2} = \frac{K P_T G_T^2 G_J \sigma_p \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{TP}^4}$$

当载机只投放箔条,用箔条进行干扰时,敌方雷达接收到的信号功率  $P_w$  为:

$$P_w = P_{TC} + P_p \quad (10)$$

当载机利用投放箔条云来散射雷达回波,利用有源干扰直接对准雷达实施干扰时,敌方雷达接收到的信号功率  $P_{J+c}$  为:

$$P_{J+c} = P_{TC} + P_p + P_{JT} \quad (11)$$

当载机利用有源干扰照射箔条云进行复合干扰时,敌方雷达接收到的信号功率  $P_F$  为:

$$P_F = P_{TC} + P_p + P_{JT} + P_{JC} \quad (12)$$

从式(10) - (12)中可以看出,基于雷达有源干扰照射箔条的干扰功率不仅仅是有源干扰和无源干扰的简单叠加,而且还出现了有源无源复合后出现的成分  $P_{JC}$ ,因此这种干扰为复合式干扰。

由于出现了有源无源复合干扰成分  $P_{JC}$ ,这样相当于在实际的箔条云和载机连线的反方向  $P_{PC}/2$  处有一个“假箔条云”,则箔条云的有效反射面积提高的倍数  $K_T$  为:

$$K_T = P_{JC}/P_{TC} = K G_J G_{J1} \lambda^2 R_{TP}^2 \gamma_1 \gamma_2 / (4\pi)^2 R_{PC}^2 R_{TC}^2 \quad (13)$$

将式(2)代入式(13)得:

$$K_T = P_{JC}/P_{TC} = K G_J G_{J1} \lambda^2 \gamma_1 \gamma_2 / (4\pi)^2 R_{PC}^2 \quad (14)$$

由式(14)可以看出,采用复合干扰后,干扰功率提高的倍数与载机干扰设备接收天线增益、发射天线增益、发射天线极化失配系数、敌方雷达接收天线的极化失配系数和敌方雷达所用波长成正比,与箔条云到载机距离的平方成反比。

## 4 仿真结果分析

为了验证复合干扰方法的有效性,文中选取以下经典参数对式(14)进行仿真分析。式(14)中参数  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  取 0.5,载机有源干扰微波放大器的功率放大倍数  $K$  取  $10^{10}$  (相对于大型干扰设备来讲,机载自卫式有源干扰设备的功率放大倍数较小,但一般都大于  $10^9$ ,典型值取  $10^{10[8]}$ ),  $R_{PC}$  取值范围为 30 - 210 m、210 - 1 000 m。(当  $R_{PC}$  为 30 - 210 m 时,为箔条云展开的时间即箔条云从投放至达到额定雷达截面的时间;当  $R_{PC}$  大于 210 m 时为飞机做机动逃逸时间<sup>[5]</sup>)。  $\lambda$  取  $3.5 \text{ cm}^{[9]}$  和  $3 \text{ cm}^{[10]}$ ,由式(14)仿真计算结果见图 2

和图3。

载机干扰设备的接收和发射天线增益值可由天线增益和波束宽度的经验公式确定<sup>[8]</sup>,即:

$$G = q/Q_E Q_H$$

式中: $G$ 为天线增益; $Q_E$ 、 $Q_H$ 分别为天线的水平和垂直方向上以度为单位的半功率波束宽度; $q$ 取值范围为25 000–35 000。

对于接收天线,当 $Q_E$ 取 $30^\circ$ , $Q_H$ 取 $25^\circ$ 和 $q$ 取28 000时可满足条件,此时 $G_{J1} = 37$ 。对于发射天线, $Q_E$ 取 $25^\circ$ , $Q_H$ 取 $30^\circ$ 和 $q$ 取32 000,可满足条件,则 $G_{J1} = 43$ <sup>[11]</sup>。

由图2可以看出,无论对于敌方雷达波长是3 cm还是3.5 cm,在箔条云从投放至达到额定雷达截面的时间里,采用有源干扰照射箔条云进行复合干扰能将敌方雷达接收到的箔条云回波信号功率提高几百倍甚至几千倍,极大地缩短了箔条云的展开时间,为飞机逃逸争取了宝贵时间。

由图3可以看出,无论对于敌方雷达波长是3 cm还是3.5 cm,在飞机做逃逸机动的时间里,采用有源干扰照射箔条云进行复合干扰能将敌方雷达接收到的箔条云回波信号功率提高几十倍甚至几百倍。根据箔条干扰压制系数公式: $K_a = (P_w/P_p)_{\min}$ , $K_a$ 为箔条干扰压制系数。当 $P_p$ 不变, $P_w$ 增大后, $K_a$ 随 $P_w$ 同比例增大。

虽然机载自卫式有源干扰设备的功率放大倍数采用比较保守的数值,但在应用有源复合干扰后反射面积提高的倍数是非常可观的。

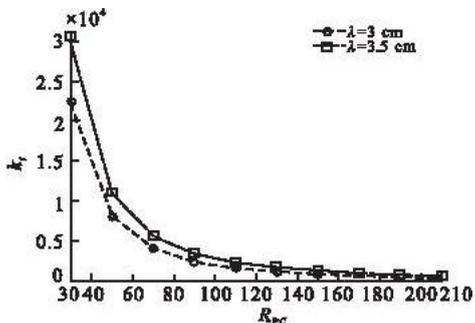


图2 箔条云有效反射面积提高的倍数  
(箔条云展开时间)

Fig. 2 The times of the scatter area of chaff cloud  
(the deploy time of chaff cloud)

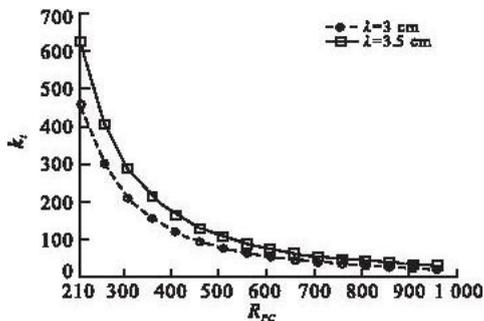


图3 箔条云有效反射面积提高的倍数  
(飞机做逃逸机动时间)

Fig. 3 The times of the scatter area of chaff cloud  
(the escape time of plane)

## 5 结束语

综合运用箔条干扰、雷达有源干扰技术的策略——照射箔条,优点非常突出。概括讲,箔条云反射的有源干扰信号,功率大于载机反射的雷达信号,箔条云反射的有源干扰信号,具有多普勒干扰频率,可以利用雷达告警器的全向告警能力,引导有源干扰设备照射箔条云,箔条云反射的有源干扰信号,可以干扰有源干扰范围以外的雷达信号,对多目标、多方位、不同距离的雷达目标实施干扰。

通过照射箔条云,增大敌方雷达接收信号强度,达到了进行干扰的目的。通过仿真计算得到在箔条云从投放至达到额定雷达截面的时间里,用有源干扰照射箔条云进行复合干扰能将敌方雷达接收到的箔条云回波信号功率提高几百倍甚至几千倍;在飞机做逃逸机动的时间里,采用有源干扰照射箔条云进行复合干扰能将敌方雷达接收到的箔条云回波信号功率提高几十倍甚至几百倍。从而使箔条干扰压制系数也提高相应的倍数。此方法效果非常明显。如果机载干扰机对接收到的敌方雷达信号进行频率调制,使载机干扰机照射到箔条云上的信号相对敌方发出的雷达信号有一定的频移。使敌方雷达认为箔条云是运动的,干扰效果更加明显。

## 参考文献:

[1] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

- WANG Xing. Airborne countermeasure counter measure theory[M]. Beijing: National defense industry press, 2008. (in Chinese)
- [2] 孙伟通,姜峰. 无源干扰走廊研究[J]. 光电技术应用, 2005,20(6):28-31.  
SUN Weitong, JIANG Feng. Research on jamming corridor[J]. Electro-optic technology application, 2005,20(6):28-31. (in Chinese)
- [3] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1985.  
LIN Xiangping. Radar countermeasure theory [M]. Xi'an: Publishing house of northwest telecommunication engineer college, 1985. (in Chinese)
- [4] 张永顺. 雷达电子战原理[M]. 北京:国防工业出版社,2007.  
ZHANG Yongshun. Radar EW theory[M]. Beijing: National defense industry press, 2007. (in Chinese)
- [5] 陈静. 干扰走廊的功能与雷达体制无关[J]. 光电技术应用,2005,20(4):38-42.  
CHEN Jing. There is no relationship between the function of Jamming corridor and radar system [J]. Electro-optic technology application, 2005,20(4):38-42. (in Chinese)
- [6] 王小谟. 雷达与探测[M]. 北京:国防工业出版社,2008.  
WANG Xiaomo. Radar and detection[M]. Beijing: National defense industry press, 2008. (in Chinese)
- [7] Skin V S A, Shustov L N. Fundamentals of electronic warfare [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2004.
- [8] 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(4):1-3.  
GAN Yuanliu. Actuality and development of jamming corridor[J]. Electro-optic & passive counter-measure, 1999,4(4):1-3. (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,2007,36(4):57-60.  
SU Fu, WANG Xiaonian, PI Junming, et al. Simulation and analysis of jamming effectiveness of jamming corridor on ground early warning radar[J]. Fire-control radar technology, 2007,36(4):57-60. (in Chinese)
- [10] 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,2008,26(3):259-263.  
HU Song, LU Jingshuang, XU Tong. Effect evaluation of chaff suppress jamming on power attenuation of radar signal [J]. Journal of Jilin university: information science edition, 2008,26(3):259-263. (in Chinese)
- [11] 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,2009,32(4):31-33.  
LU Jingshuang, HU Song, ZHOU Rui. Research into the jamming efficiency of corridor chaff to MTI radar[J]. Shipboard electronic countermeasure, 2009,32(4):31-33. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## An Effective Compound Jamming Method Based on Radiation on Chaff Cloud

LI Yang, WU Hua, WANG Hong-wei, CHENG Si-yi

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to solve the degeneracy of the jamming ability of chaff cloud, a compound jamming method is proposed. The jamming process is as follows: The signal of enemy airborne fire control radar or air missile's seeker is received by airborne electronic jamming equipment, and then the signal is irradiated on chaff cloud by airborne complexity launching antenna. The jammed signal is reflected by chaff cloud, which will be received by enemy radar, forming a false target, and this false target is different from the false target formed by the irradiation on chaff cloud of radar signal. The simulation results show that using this compound scheme the scatter area of chaff cloud received by enemy is enlarged by even hundreds of times compared with the original one, enhances blanketed ratio. So the spread time of chaff cloud is shortened and the feasibility of this method is validated. The comprehensive jamming ability of aircraft is boosted by using the compound jamming method. Therefore, the method, to some extent, is of a stronger practical value.

**Key words:** compound jamming method; radar echo; chaff cloud; simulation