

论地对空雷达干扰系统 在局部战争中的作用及其发展

张锡祥

(信息产业部电子第二十九研究所, 成都 610036)

[摘要] 文章介绍了从地对空干扰机的发展概况, 从单一干扰轰炸瞄准雷达, 发展成地对空干扰系统和系列, 可以干扰空载作战飞机雷达、导弹制导雷达、精密制导雷达、预警机雷达、星载探测雷达等, 分析了这些雷达的干扰原理、干扰方法和干扰机的布局。文章对新体制雷达的干扰压制系数进行了分析, 导出各类新体制雷达的干扰压制系数表达式, 并提供了计算机仿真和实际试验的结果。文章分析了90年代以来两次现代化局部战争, 地对空干扰系统若能发挥作用, 将使被入侵国家的损失率下降, 使入侵者的损失率升高。地对空干扰系统具有攻防兼备的立体干扰系列功能, 需要经费较低, 很适合于第三世界国家的需求, 具有广泛的发展前景。

[关键词] 地对空干扰系统; 在现代化战争中作用; 发展前景

1 引言

在海湾战争和空袭南斯拉夫的两次现代化局部战争中, 空对地电子装备, 起到了兵力倍增器的作用。但是, 这两次战争, 都是以强对弱, 一方占有制空权和制电子权的实力严重不平衡的战争, 一方的空袭武器充分发挥作用, 而被袭击方的防空兵器受阻。地对空干扰系统的作用能使被袭方的防空兵器充分发挥作用, 而使空袭方的兵器作用受到限制。在未来具有实力相当的国家之间的现代化局部战争中, 入侵者不会以数万分之一的损失率取得空袭胜利。双方命中对方的概率将大幅度地降低。

地对空干扰系统也是己方航空兵和导弹突防的掩护者, 使对方预警机雷达的探测距离受干扰后降低数倍, 充分使己方的突防能力增强。

对处于战略进攻的国家, 对地对空雷达干扰系统的重视程度较差, 对处于战略防御或有进攻也有防御的国家, 对地对空雷达干扰系统重视程度较高, 随着武器不断发展, 战略的后方和前方差别越来越小, 各国对地对空雷达干扰系统将更加重视。

2 地对空雷达干扰系统的发展概况*

最初的对地空雷达干扰, 主要是用于干扰轰炸瞄准雷达、地形回避雷达, 保护地面高价值的军事点目标。随着军事技术的不断发展和完善, 空对地雷达又有新的发展, 空地制导雷达、导弹末制导雷达、预警机雷达、红外激光制导等进行干扰。

地对空雷达干扰技术装备的发展分为四个阶段: 第一阶段, 约在五六十世纪, 干扰设备中主要用电子管器件, 收发设备平台采用分离式; 第二阶段, 约在70年代, 部分电路用晶体管器件, 收发设备装在一个平台上, 收发天线分开; 第三阶段, 约在80年代, 大量采用中小规模集成块, 收发装在一个平台上, 有些干扰设备采用收发共用一个天线; 第四阶段, 约在80年代后期和90年代, 设备采用大规模集成电路, 微型计算机控制, 多波束天线系统等。

地对空干扰的干扰对象, 由单一的干扰轰炸瞄准雷达发展到干扰作战飞机上的雷达、预警飞机上的雷达、精密制导雷达、星载雷达等。

地对空干扰所掩护的目标, 由掩护地面高价值

[收稿日期] 2000-05-19; 修回日期

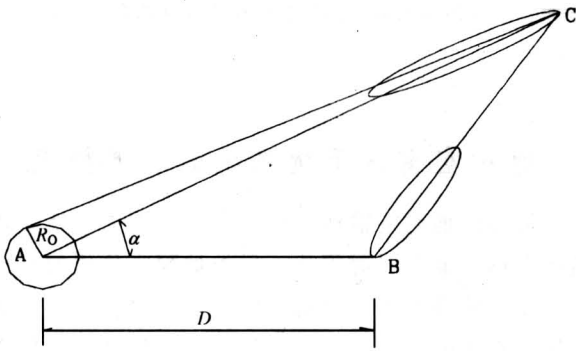
[作者简介] 张锡祥(1933-), 男, 山西文水县人, 中国工程院院士, 信息产业部电子第二十九研究所研究员

* 文中数据和信息是由有关资料整理得来的, 参考文献不一一列举

的点目标发展成掩护地面半移动的高价值军事目标，支援航空兵和导弹突防，支援歼击航空兵在一定的空域里作战，干扰星载的电子设备，进行地对地的干扰。地对空干扰系统可以形成从地面到太空的全方位立体干扰。地对空干扰系统也是第三世界国家对付强权者的最有效、最经济、能够使防空兵器最大发挥作用的有效保障。大功率的地对空干扰机也是过渡到高功率微波能武器的桥梁。

3 地对空干扰系统对飞机雷达的干扰

半移动地面点目标是指坦克集结地、炮兵阵地、导弹发射阵地、军事指挥所等。它的军事价值很大，但又不固定，飞机要想攻击它，必须先开雷达寻找。飞机上雷达开机寻找目标的过程，也是地对空干扰机发挥干扰作用的时机。示意图见图1。



A点表示被保护目标的中心；B点表示干扰机位置；C点表示被干扰雷达位置； R_0 被掩护目标的半径； D 干扰站和保护目标中心点之间的距离； σ 被掩护目标的有效反射面积

图1 掩护目标、干扰站及被干扰雷达相对位置

Fig. 1 Relative geometric locations between protected target, jamming station and victim radar

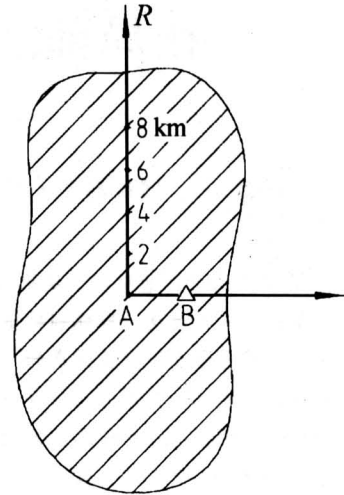
3.1 地对空干扰系统掩护地面半移动点目标

根据干扰方程导出所需的干扰等效功率算式：

$$P_j G_j = \frac{K_1 K_0 \sigma P_a G_a [R_0^2 + H^2 + D^2 - 2D \sqrt{R_0^2 + H^2} \cos \alpha]}{4\pi K_1 K_2 K_f \theta_{0.5} (R_0^2 + H^2)^2 \cdot K(\theta)} \cdot \left\{ \arctan \left(\frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + H^2}} \right) + \arcsin \frac{D \sin \left[\arccos \left(\frac{R_0 \cos \alpha}{\sqrt{R_0^2 + H^2}} \right) \right]}{\sqrt{R_0^2 + H^2 + D^2 - 2D \sqrt{R_0^2 + H^2} \cdot \cos \alpha}} \right\}^2 \quad (1)$$

式中： K_1 干扰机馈线损耗； K_2 天线副瓣系数； K_f 雷达接收机带宽与干扰带宽比； $\theta_{0.5}$ 雷达天线波束半功率电平宽度； $K(\theta)$ 干扰天线增益与雷达天线增益所在区的比值； K_0 为雷达发射机馈线

损耗； $P_a G_a$ 为雷达等效辐射功率。若取 $K_1 = 0.5$, $K_2 = 0.1$, $\theta_{0.5} = 1.5^\circ$, $P_j G_j = 100 \text{ kW}$, $H = 6 \text{ km}$, $K_0 = 0.4$, $P_a G_a = 100 \text{ MW}$, $D = 3 \text{ km}$, $R_0 = 1 \text{ km}$, $K(\theta) = 9$, 代入式(1), 可算得图2。



A点被掩护目标的中心；B点干扰机所在的位置。

图2 地对空干扰机保护地面点目标时干扰暴露区

Fig. 2 Jamming exposed area in which ground-to-air jammer protects the ground point target

如果地对空干扰系统按三点式环形典型配置，每隔 120° 配置一个点，则形成的干扰暴露区如图3所示。总的干扰暴露区缩小了。

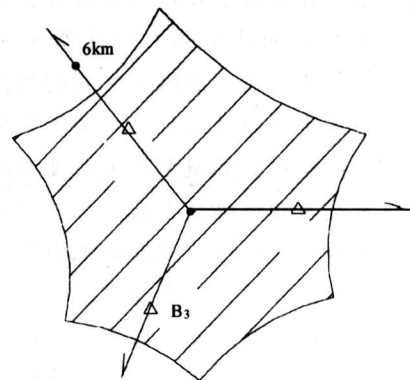


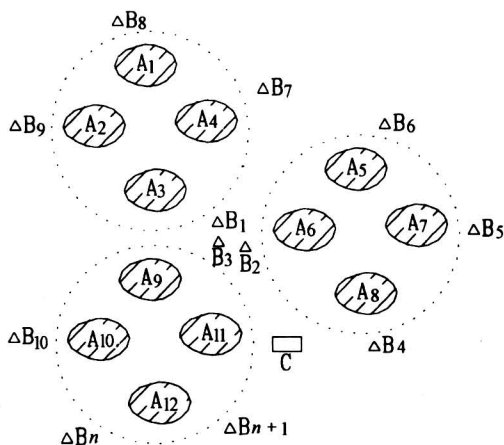
图3 干扰系统环形配置的干扰暴露区

Fig.3 Jamming exposed area in case of the ring configuration of jamming systems

3.2 干扰系统掩护二炮阵地的干扰配置

如果被掩护的目标是分布式的配置时，则地对空干扰系统的配置也应根据被掩护目标配置特点进

行分布配置，如图 4 所示。多站配置可以互相掩护，可以对抗反辐射导弹的攻击。



A_1, A_2, \dots, A_n 为被保护的目標位置； A_1, A_2, \dots, A_n 的斜线区为地对空干扰掩护的暴露区； $B_1, B_2, \dots, B_n, B_{n+1}$ 为地对空干扰站的配置点； C 为地对空干扰系统指挥站

图 4 掩护二炮阵地的地对空干扰机配置

Fig.4 Location configuration of ground-to-air jammers which protects missile site

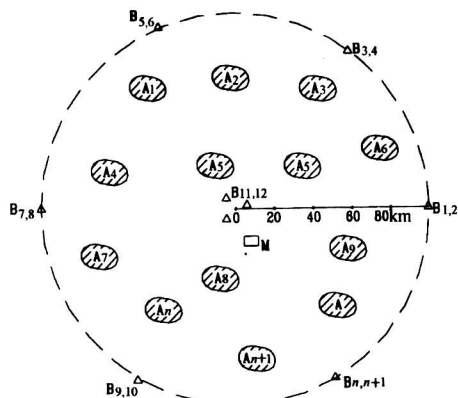
3.3 地对空干扰系统对空支援干扰配置

地面半移动式重要点目标，一般等效反射面积比较小，约为数十至数百平方米，而且离散性较大，可能分布在数万平方公里的区域内，地对空干扰系统掩护分布离散的地面半移动式点目标及对空支援干扰见图 5。

如果，敌人作战飞机进入图 5 的虚线圈内，地对空干扰机可对它形成多方向干扰，使它不能发现地面目标，同时还可以干扰它的歼击机上的雷达，使它变成“近视眼”，支援我方的歼击航空兵对它攻击，这是地对空干扰应用的一个新构想，地对空干扰机组成，它具有的功能以及具体的干扰效果需要实际试验确定。

4 对空对地精密武器电子设备的干扰

空对地精密打击武器的精密是因为它上面装有精密的制导设备，这些精密制导电子设备包括：导弹末制导雷达、红外、激光制导雷达、无源跟踪雷达、激光制导炸弹、地形匹配加 GPS 导航等。这些制导设备均属近距离制导。它的有效精密制导区约为地对空干扰机的干扰暴露区，如果不采取对抗措施，将会使我方受到很大威胁，造成很大损失和伤亡。



$B_1, B_2, \dots, B_n, B_{n+1}$ ，为干扰机配置点， M 为指挥站配置点， $A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}$ ，为被地对空干扰机掩护的半移动式重要的离散性分布的军事目标。 $A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}$ ，附近的横线区为每一个目标的干扰暴露区

图 5 地对空干扰系统的配置

Fig. 5 Schematic diagram for semi-mobile targets spreaded spatially and protected by ground-to-air jamming systems and air defense support jamming

对精密制导电子设备，可以采取的措施：

- 对导弹末制导雷达，可以采用地对空干扰或其它干扰的措施。
- 对红外、激光制导的精密打击武器，可以采用红外、激光干扰或红外、激光诱饵等。
- 对无源跟踪雷达，可以采用多点源干扰等措施。
- 对采用 GPS 加地形匹配制导的巡航导弹，可以干扰其 GPS 导航和干扰它的测高雷达使其爬高，便于我方防空武器射击，或使其降低，自行接地爆炸。采用干扰措施后，将会使精密制导武器的命中概率大幅度地下降。

设精密打击武器的命中概率为

$$P_n = (1 - e^{-K_1}) \cdot (1 - e^{-K_2}) \tag{2}$$

若不受人干扰时 $K_1 \approx 1; K_2 \approx 10$ ，则精密打击武器的命中概率为 $P_{n1} \approx 63\%$ 。若机载雷达未受干扰， $K_1 \approx 1$ ；弹上的精密制导设备受干扰， $K_2 \approx 0.3$ ；精密制导武器命中概率为 $P_{n2} = 15.9\%$ 。若载机上的雷达受干扰，弹上精密制导设备未受干扰， $K_1 \approx 0.15, K_2 \approx 10$ ，得 $P_{n3} = 13.7\%$ 。若载机雷达和弹上精密制导设备均受干扰， $K_1 \approx 0.15, K_2 \approx 0.3$ ，算得 $P_{n4} = 3.7\%$ 。

由上述计算表明，精密打击武器，未受到干扰时，其命中概率为 63%；受到干扰后，其命中概率降

为 3.7%。这个计算值与越战中的地对空导弹的命中概率统计值相接近,未受干扰时命中概率为 85% 以上,受干扰后命中概率降为 3%~5%。中东战争反辐射导弹的命中概率,在受干扰的情况下命中概率平均为 3%。

5 对预警机雷达的干扰

对预警机雷达的干扰是地对空雷达干扰系统的主要任务之一。预警飞机,起源于 20 世纪 60 年代越南战争,由于侵越美军感到雷达探测距离不够,就想把它装在飞机上升高,来提高雷达的探测距离。从 70 年代到现在已经有 20 多个国家,50 多家厂商研制预警飞机,经过实战考验的预警飞机有美国的 E-3A、E-2C 预警飞机和 E-8A 战场监视飞机。这些预警飞机在海湾战争和对南联盟的空袭战中发挥了重大作用,起到了探测指挥和空中指挥所的作用,预警飞机在现代战争中的作用明显增强。但是,这两次的局部战争均是以强对弱,预警机的弱点还没有暴露出来。对预警飞机的对抗手段,基本可以分为两类,一种是硬杀伤,用歼击航空兵或导弹攻击。另一种用干扰的手段,使它的雷达由“千里眼”变成“近视眼”,从而抵消预警机的探测作用。这两种手段各有各的优缺点,最好是同时并用优势互补,例如,在进攻时,先由地对空干扰,将预警机雷达的探测距离由 460 km 降低到 50 km 以内,用以掩护歼击机或导弹突防,接近到 50 km 以内时,由歼击机或弹上的自导系统起作用,这样可以增强突防能力,提高命中概率。

5.1 对预警机雷达的基本干扰原理

干扰保护区和干扰机等效功率估算:设 A 点为干扰机所在位置, B 点为预警飞机所在位置, C 点为 B 点的投影点, D 点为 E 点的投影点, E 点为被掩护的目标,如图 6 所示。

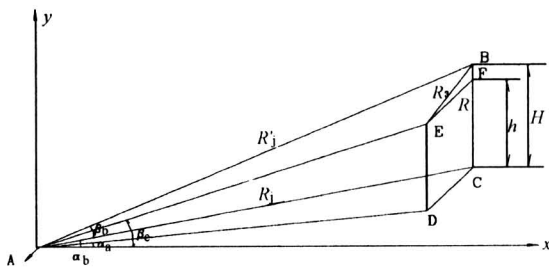


图 6 干扰站与预警机的相对位置图

Fig.6 Relative location between jamming station and early warning aircraft

按照电子对抗的基本公式可写出干扰压制系数

$$K_j = \frac{4\pi P_j G_j [R^2 + (H - h)^2]^2 G_a(\theta) \cdot K_f}{P_a G_a^2 \sigma (R_j^2 + H^2) K_1} \quad (3)$$

式中: R 为被掩护飞机和预警机之间的水平距离, R_j 为干扰和预警机之间的水平投影距离, $P_j G_j$ 为干扰机的等效功率, H 为预警机的飞行高度, h 为被保护的目标高度, $G_a(\theta)$ 预警机雷达天线的副瓣增益, K_f 雷达中频带宽与干扰频谱宽度之比, $P_a G_a$ 预警机雷达等效功率, σ 被保护目标的有效反辐射面积, K_1 雷达馈线损耗。

由式 (3) 得干扰预警机雷达的等效干扰功率

$$P_j G_j = \frac{K_j P_a \sigma (R_j^2 + H^2) K_1 G_a^2}{4\pi [R^2 + (H - h)^2]^2 K_f G_a(\theta)} \quad (4)$$

由于 $R_j \gg H, R \gg H$, 式 (4) 可化简为

$$P_j G_j = \frac{K_j P_a G_a \sigma R_j^2 K_1}{4\pi R^4 K_f K_2} \cdot \frac{G_a}{G_a(\theta)} \quad (5)$$

例如,对 E-2C 雷达的干扰:已知 $P_a G_a = 1.4 \times 10^8 \text{ W}$, $K_j \approx 30$, $\sigma \approx 10 \text{ km}^2$; $K_1 \approx K_2$; $R \approx 50 \text{ km}$; $R_j = 300 \text{ km}$, $G_a/G_a(\theta) = 4 \times 10^3$. $K_f \approx 0.3$, 算得 $P_j G_j = 640 \text{ kW}$ 。如果发射天线增益 $G_j = 23 \text{ dB}$, 则干扰发射机功率为 3.2 kW。

5.2 对预警机雷达干扰暴露区计算

以干扰 E-2C 预警机雷达为例。设 $P_a G_a = 81 \text{ dBW}$, $P_j G_j$ 等于 50 dBW 或 60 dBW, $R_j = 300 \text{ km}$, $K_j = 30$, $K_f = 0.3$; $K_1 \approx K_2$; $\sigma = 10 \text{ m}^2$ 。算得数据见表 1。

表 1 对预警机雷达干扰暴露区计算数据

Table 1 Calculation data on jamming exposed area against early-warning radar

θ / ($^\circ$)	$G_a(\theta)/G_a$ /dB	$P_j G_j = 50 \text{ dBW}$ R_{\max}/km	$P_j G_j = 60 \text{ dBW}$ R_{\max}/km
1	0	11	6.2
4	-3	13	7.4
8	-10	19.5	11
16	-20	34.6	19.5
30	-34	77.2	43.6

根据表 1 的数据,可以绘制出对 E-2C 的干扰暴露区见图 7。1 区为 $P_j G_j = 60 \text{ dBW}$ 的干扰暴露区; 2 区为 $P_j G_j = 50 \text{ dBW}$ 的干扰暴露区; A 点为预警飞机所在位置; B 点为干扰机所在位置。

由图 7 可以看出,当预警机雷达未受干扰时,它的探测区为虚线圈内,当预警机雷达受干扰后它

的探测区变成横/斜线区。受干扰后使它的有效探测区域缩小了 97.2% 以上。如果用地对空干扰机掩护歼击机或导弹对预警飞机攻击时，被掩护的歼击机或导弹从 $\pm 10^\circ$ 角内进入，则预警机雷达发现被掩护的飞机或导弹的最大距离小于 20 km。

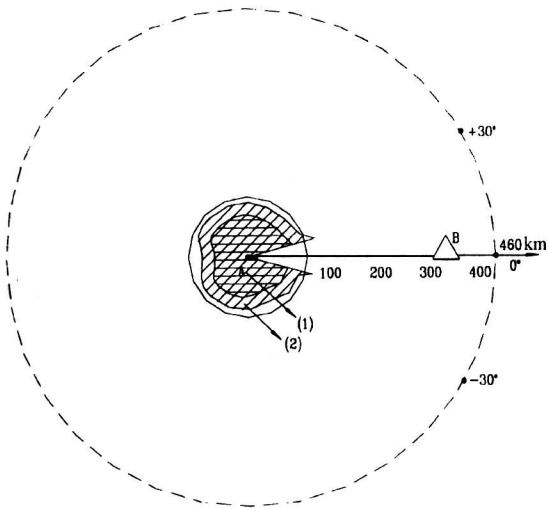


图 7 对 E-2C 预警机雷达干扰压制暴露区
Fig.7 Jamming suppression exposed area against the early-warning radar on E-2C

5.3 干扰系统对预警雷达的干扰

地对空干扰系统对预警机雷达的干扰效果，如图 8 示例，平时预警飞机在台湾上空飞行，它可以探测到永安以东广大地区的大陆飞机活动，使它的预警时间比地面警戒雷达提早了十几分钟，如果将地对空干扰机放在沿海一线，如 B_1, B_2, \dots, B_5 位置，预警机还按原航线飞行，受干扰后它的探测区变成斜线区，只能看到台湾岛附近的目标。这样，预警机不能正常发挥，将丧失它应有的作用。

地对空干扰预警机雷达系统花钱少，作用大，和平时期可以使预警飞机不能探测大陆飞机的活动情况，战争时期它可以掩护歼击航空兵和导弹对预警机的攻击。在装备费付出后，作战时所花的费用只是些维护费和电费。因此，地对空干扰系统是对抗预警机的最经济、适用的一项措施，非常适合于发展中国家对抗预警机的办法。

对预警机的干扰系统，应该根据不同的预警飞机构成一种系列：对 E-2C 预警飞机需要一种干扰系统；对 E-3A 预警飞机需要另一种干扰系统；对 E-8A 战场监视飞机则需要又一种干扰系统。

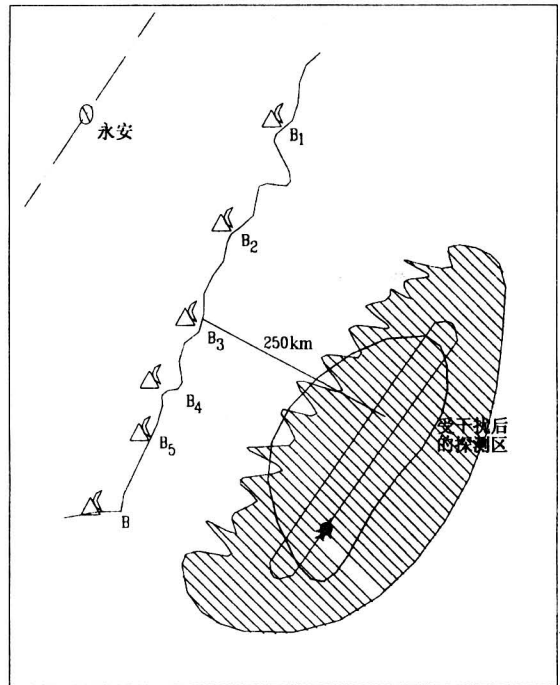


图 8 对预警机雷达多站组阵干扰暴露区
Fig.8 Jamming exposed area for combined array of multi-jamming station systems against the radar on E-2C

6 对星载成像雷达的干扰

成像雷达一般采用合成孔径体制，称为合成孔径雷达，是利用脉冲压缩体制将发射的宽脉冲处理成窄脉冲，从而提高了雷达测距的分辨率。把天线的宽波束等效变成窄波束，提高了角度分辨率。它是利用天线平台的运动过程，将每一个发射脉冲天线位置视为阵列天线单元振子位置，将这些位置不同存在的单元振子组合起来，形成一个等效大孔径天线，从而得到很高的方向分辨能力。

地面警戒雷达从山头搬上了预警飞机，在两次现代化的局部战争中起了重大作用。现在又有一个制高点，那就是军用卫星，在海湾战争和北约空袭南联盟的战争中，军事卫星起到举足轻重的作用。军用卫星的作用今后将越来越大，因此对军用卫星的对抗也就势在必行。本文只分析地对空干扰系统对星载合成孔径雷达的有关技术。

6.1 对星载合成孔径雷达干扰功率的计算方程

若卫星的高度 $h > 250 \text{ km}$ 时 $R_t \approx R_j = h$ ，可得合成孔径雷达的干扰压制系数和对星载合成孔径雷达的干扰功率分别为

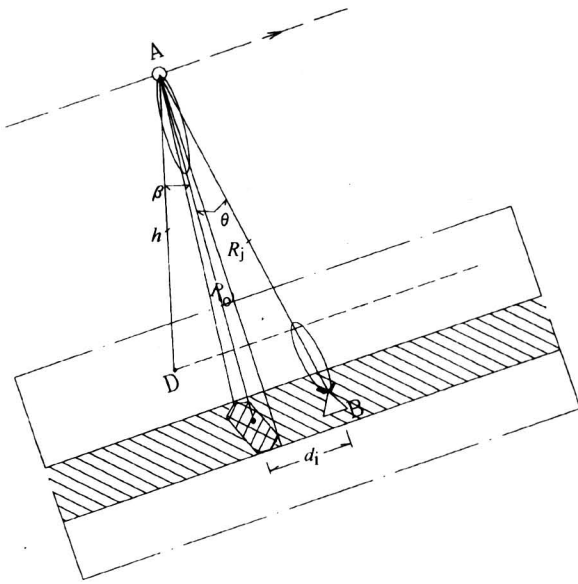
$$(K_j)_{ra} = \frac{P_j G_j 8\pi h W v}{\bar{P}_t G_t \lambda \sigma B_r} \cdot \frac{G_t(\vartheta)}{G_t} \quad (6)$$

$$P_j = \frac{(K_j)_{ra} \cdot \bar{P}_t G_t \lambda \sigma B_r}{8\pi h W v} \cdot \frac{G_t}{G_t(\vartheta)} \cdot \frac{1}{G_j} \quad (7)$$

式中： \bar{P}_t 为合成孔径雷达的平均发射功率， λ 为雷达工作波长， σ 为目标有效面积， B_r 为雷达接收机带宽， H 为卫星高度， W 为雷达分辨率， v 为卫星速度， G_j 为干扰机发射天线增益， $G_t/G_t(\theta)$ 为合成孔径雷达天线主/副瓣的增益之比。

6.2 对星载合成孔径雷达的干扰效果分析

对星载合成孔径雷达的干扰示意图见图9。



A点代表卫星位置；B点代表地对空干扰位置； h 代表卫星高度； R_0 为卫星照射区中心距离； R_j 为干扰机与雷达之间距离；斜线区为星载合成孔径雷达探测区

图9 星载合成孔径雷达探测干扰示意图

Fig.9 Schematic diagram for jamming against satellite-borne SAR

所需的干扰功率估算：若 \bar{P}_j 为1 kW； G_t 为35 dB； $\lambda=0.2$ m； $B_r=10^6$ Hz； $h=500$ km； $W=4$ m， $v=3\,000$ m/s； $G_j=35$ dB； $d_j=200$ km； $G_t/G_t(\theta)=25$ dB；($d_j=200$ km)； $(K_j)_{ra}=30$ 。代入式(7)算得数据如下：

被保护目标有效反射面积 σ/m^2	100	1 000	5 000
干扰发射机功率 P_j/kW	1.3	13	65

干扰机掩护的半移动式重要军事目标的有效反射面积一般小于5 000 m^2 。因此，干扰星载合成孔径雷达的干扰发射机功率为65 kW（连续波或平

均功率）。干扰可掩护的区域在以干扰机为圆心的半径200 km圆内，小于5 000 m^2 的目标均可掩护，即不能使合成孔径雷达对该目标成像。

6.3 对星载合成孔径雷达干扰机配置设想

把地对空干扰星载合成孔径雷达的干扰机组成一个系统配置，掩护的区域约20~30万 km^2 ，相当于一个小国的面积或大国的一个作战区。配置的方式有以下三种。

1) 小功率干扰机多站分布式配置 按掩护25万 km^2 面积分布设置，每个干扰机的功率为17 W，相隔8.5 km配置一个，需要3 460个。每个干扰机发射功率为70 W，相隔17 km配置一个需要干扰机865个。干扰机数量太多，不便于管理。

2) 大功率干扰机布阵配置 相距200 km配置一个，需要干扰站4个。

3) 大功率干扰机和小功率干扰机相结合组阵配置 配4个大功率干扰机，发射机平均功率为10~20 kW，然后根据掩护目标的位置和有效反射面积，在大的反射面积目标附近，配置一些小功率（数百瓦级）干扰机，这种组合较为合理。大功率干扰机功率，目前已能实现，干扰机数量也不多，配置见图10。

该系统可用于保护500 km×500 km区域里的重要军事目标，不被星载合成孔径雷达探测到。它可用作局部作战区域，国家首都、重要军事技术研究地区的防空系统的组成部分，构成从地面到空中至太空的立体防空体系。

7 三维一体化电子战设备可行性分析

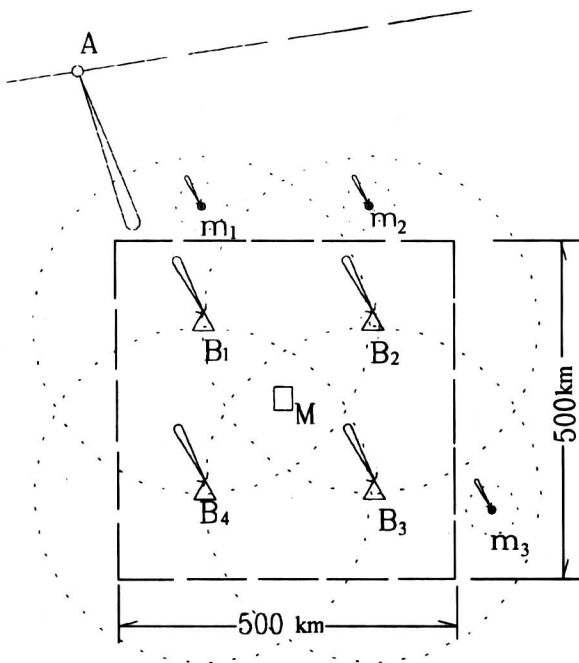
将现代化军事电子设备做成一机多用，可提高作战效率，降低装备费用，减少维护使用人员。

在现代化大功率地对空干扰机上，已具备侦察、干扰、定位的技术基础，适当增加部分设备，把它设计成三维一体化的电子战设备，在和平时期，可用作无源侦察和有源侦察（雷达）使用，在战争时期又可以做干扰，兼侦察、定位使用。

三维一体化电子战设备可通过多种方式来实施：在噪声干扰机上加‘装噪声相关接收机；在一些雷达上加装雷达侦察设备和雷达干扰设备；在大功率干扰机上加装雷达测距离装置。其中在大功率干扰机上实现最方便、最经济、最合理。

7.1 三维一体化电子战设备的组成

用地对空大功率干扰机改成三维一体化电子战



A 点为星载雷达所在位置，B 点为大功率干扰机所在位置，m 点为小功率干扰机所在位置，M 为指挥控制站

图 10 大小功率结合的地对星干扰系统干扰示意图

Fig.10 Schematic diagram for combination jamming system composed of high-power jammers and low-power jammers against satellite-borne SAR

设备的基本组成见图 11。设备组成包括侦察控制车、干扰车和 1 辆油机车，组成大功率地对空干扰机的整机系统。如果在干扰车内增加一个测距分系统来完成接收测距任务，再加上原来的干扰机系统具备的测向功能，就可以完成对目标的定位，它所能完成的功能，远远超过大功率干扰机具有的功能，而增加的费用不到大功率干扰机总费用的 10%。

7.2 三维一体化电子战设备技术指标

测频带宽：4 倍频程

测频精度：1 MHz

测向精度： $<1^\circ$

测频精度：10 kHz 量级

对预警机雷达的干扰效果：可使它的探测区缩小 90% 以上
可侦察/干扰的雷达：包括现有的各种体制雷达

被动角跟踪精度： $<0.5^\circ$ (均方根值)

对预警机雷达的侦察距离：400 km 可对副瓣进行侦察

干扰距离：在 $R_j = 80 \sim 400$ km 范围内有效干扰预警机雷达
做为雷达可探测的距离：335 km

距离分辨率 (脉冲压缩体制)：300 m

8 干扰机向高功率微波能武器发展

军事专家把武器的发展划分为三个阶段，即：冷武器时代；热武器时代和微波能武器时代。随着电子技术的进一步发展可以产生高能微波源，用它

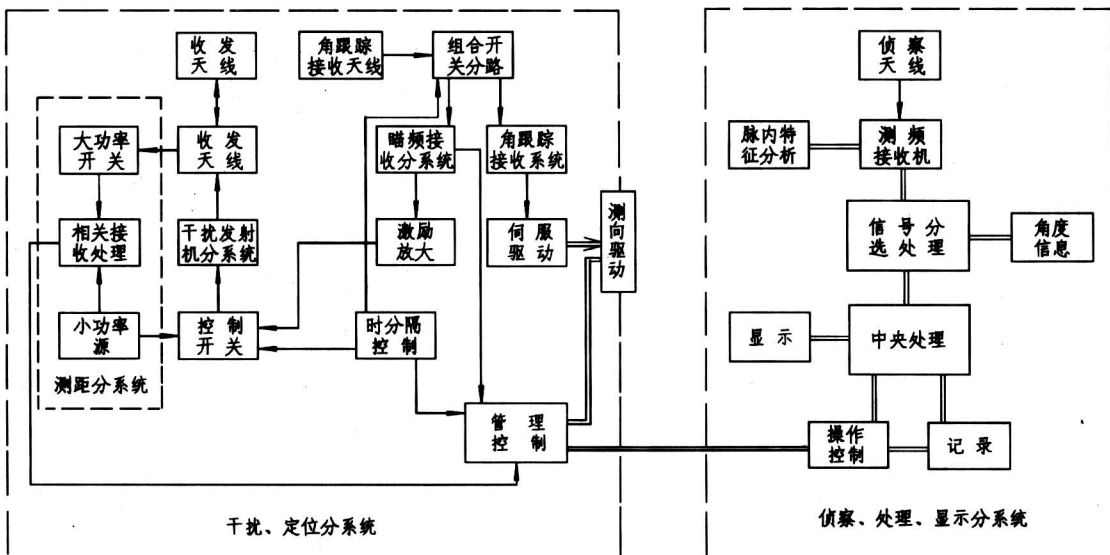


图 11 三维一体化电子战设备组成原理框图

Fig.11 Basic composition diagram of integrated 3-D EW equipment

制成微波能武器,对电子装备、运载平台和人员进行破坏和杀伤。这需要平均等效功率约 90 dBW,峰值等效辐射功率约 130~150 dBW,除天线增益外,发射机的输出平均功率为百千瓦量级,而现在设备发射的峰值功率为兆瓦量级,离用做武器还差四五个数量级。

由于它的有效辐射功率特别大,在干扰的机理上产生一些新的概念,如进行失谐干扰,对超低副瓣雷达干扰,对侦察卫星干扰,对专职干扰飞机上的电子设备干扰,对微波器件进行损伤性干扰,对生物的伤害性干扰等。这些概念与常规干扰机有很大差别。对其研究,将使干扰技术产生一个飞跃性的发展,使之能够进入武器发展的第三时代。

高功率微波武器能够产生的效果,对各国的军事科学家具有很大的吸引力,美、苏早在 80 年代就开始研究这种武器,中国也在 90 年代初开始研究这些问题。由于现有器件与实际要求还差四五个数量级,一些国家采用了结合现实需求牵引,分阶段实现的步骤,发展自己的微波能武器。在地对空大功率干扰机上,我国首先以干扰预警飞机上的大功率雷达为需求,迈出“高功率微波武器”研制的第一步,接着以干扰星载电子设备为需求,跨出“高功率微波武器”研制的第二步。这两个步骤,可使发射管的平均功率达百千瓦量级,并解决大功率发射机的供电、散热、微波传输、大功率微波器件、大功率微波器件控制、大功率微波器件的测试设备和测试场地、外场试验等一系列技术关键。然后进入第三阶段,使器件在平均功率百千瓦量级的基础上降低重频,向高功率微波武器发展,峰值功率达数十吉瓦量级,再配上几十分贝增益的天线,这个设备就可作为高功率微波武器来使用。

设备受干扰后不能正常工作,当干扰去掉后又不能正常工作,称为干扰机效应。如果设备受干扰和干扰去掉后设备均不能正常工作,需要修复后才能正常工作,称为微波能武器的效应,这是两者根本区别之处。地对空大功率干扰机可以干扰预警飞机雷达和干扰星载合成孔径雷达,受这个需求的牵引,需要发展这种大功率干扰机,并逐步向高功率微波武器方向发展。

9 对新体制雷达干扰效果的分析

现代电子技术的发展,雷达由常规脉冲雷达发展出许多新体制雷达,雷达采用的这些新体制、新

技术都给干扰机带来了许多困难和麻烦。新体制雷达,包括脉冲压缩雷达,脉冲多普勒雷达,合成孔径雷达,捷变频雷达等。

这些新体制雷达出现后,那些原有的干扰方程和雷达方程、干扰压制系数的概念等还是适用的。干扰压制系数定义:在干扰暴露距离 R_{\min} 确定的情况下,在雷达接收机输入端上干扰有效压制系数为干扰与信号功率之比的最小值。干扰压制系数为

$$K_j = \frac{4\pi P_j G_j R^4 K_f L_j}{P_a G_a \sigma R_j^2 L_a} \cdot \frac{G_a(\theta)}{G_a} \quad (8)$$

式中: $P_a G_a$ 为雷达等效辐射功率,这是由被干扰的雷达确定的; σ 为被掩护目标的有效反射面; K_f 为雷达接收机有效通带宽度与干扰信号频谱宽度之比; R 为雷达与被掩护目标之间的距离,根据战术使用要求,它有一个确定的最小值 R_{\min} ,通常称最小干扰暴露距离,也称烧穿距离; $G_a(\theta) / G_a$ 为雷达天线的副瓣增益与主瓣增益之比。

$P_j G_j$ 为干扰机等效辐射功率。在其它参数确定后, K_j 与 $P_j G_j$ 成正比,不同体制的雷达,需要不同的干扰压制系数,也就需要不同的干扰等效辐射功率。实际上,对新体制雷达的干扰压制系数取值有的相差两三个数量级。

9.1 对脉冲压缩雷达干扰压制系数取值概念分析

在没有干扰时,对大型战斗机或轻型轰炸机的最大探测距离 R_{\max} 方程式中,包括了所有影响雷达最大探测距离的因素。

设某一常规脉冲雷达 $E_t = P_{t1} \tau_0$, 脉冲宽度为 τ_0 ; 接收机带宽为 B_0 , 可得到

$$R_{\max 1} = 796.7 \left(\frac{P_{t1} \tau_0 L_r L_t G_t G_r}{f^2 NF} \right)^{1/4} \cdot \left[\frac{k_1 \tau_0 B_0}{4} \left(1 + \frac{K_2}{\tau_0 B_0} \right)^2 \right]^{-1/4} F_1^{1/12} \quad (9)$$

若将此雷达改成脉冲压缩雷达,发射脉宽为 τ_1 , 压缩后的脉宽为 τ_2 , 接收机带宽 B_1 , 峰值功率为 P_{t2} , 重频为 F_2 , 其它参数不变,可得到

$$R_{\max 2} = 796.7 \left(\frac{P_{t2} \tau_1 L_r L_t G_t G_r}{f^2 NF} \right)^{1/4} \cdot \left[\frac{K_1 \tau_2 B_1}{4} \left(1 + \frac{K'_2}{\tau_2 B_1} \right)^2 \right]^{-1/4} F_2^{1/12} \quad (10)$$

由常规脉冲雷达改成脉冲压缩雷达增加了探测距离,脉冲宽度增大可增大脉冲能量,但影响距离分辨率。因此,增宽发射脉冲以解决增大探测距离,而把接收机输出的脉冲宽度压窄以提高雷达的

距离分辨率。这样，脉冲压缩雷达成了当代的一种新体制雷达。

定义脉冲压缩雷达比常规脉冲雷达的好处，即得益系数

$$K_{d1} = (R_{max2}/R_{max1})^4 \quad (11)$$

$$\text{也可写成 } K_{d1} = \frac{\tau_1/\tau_2 \cdot 1}{\tau_0/\tau_2 \cdot K_0} = \frac{D}{D_0 K_0}$$

式中： P_{c1} 为常规雷达时的峰值功率； τ_0 为常规雷达时的脉冲宽度； τ_1 为改成脉冲压缩雷达后的发射机脉宽； τ_2 为脉冲压缩后的脉冲宽度； D 为脉冲压缩比； $D_0 = \tau_0/\tau_2$ 为脉冲压缩后由于增大接收机带宽使信/噪比降低的损失系数；而

$$K_0 \approx \left[\frac{1.3 + K'_2}{1.3 + K_2} \right] \quad (12)$$

式中： K_2 为常规脉冲雷达时的脉冲矩形系数， K'_2 为改成脉冲压缩雷达后，发射脉冲变宽情况下的矩形系数。

式(11)也可以写成

$$K_{d1} = \frac{P_{c2}}{P_{c1}} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_0 K_0} \cdot \frac{F_1}{F_1} \cdot \frac{F_2}{F_2} \cdot \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^{1/3} = \frac{\bar{P}_{c2} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{2/3}}{P_{c1}} \quad (13)$$

式(13)的含义，一部常规雷达改成脉冲压缩雷达后，如果平均功率和重频都不变，则雷达在探测距离上就没有得到好处。

设对新体制雷达的干扰压制系数

$$K_{jz} = K_j K_{d1} \quad (14)$$

K_j 为常规脉冲雷达的干扰压制系数， K_{d1} 为常规脉冲雷达改成脉冲压缩雷达后的得益系数，实验证实 K_j 和 K_{d1} 通常取值分别为 2~3 和 14~30。对脉冲压缩雷达实际干扰试验反推算和计算机仿真试验， $K_{jz} = 28 \sim 90$ 。

对新体制雷达的干扰压制系数分析表明，常规雷达改成新体制雷达后得益系数多大，其干扰压制系数就应增大多大。

9.2 对脉冲多普勒雷达干扰压制系数取值

脉冲多普勒雷达主要是为了能在较强的地杂波和海杂波的背景中提取有用信息而研制的，采用了相关接收和多普勒滤波等手段使脉冲多普勒雷达能在负信杂比的情况下提取有用信号，极大地改善了雷达的低空性能，也给雷达抗干扰带来一些好处。

若天线特性、目标有效反射面、干扰距离、馈线损耗等没有变时，常规脉冲雷改成脉冲多普勒雷达后，平均功率和脉冲宽度不变，干扰等效功率的变化倍数为

$$K_p \approx \frac{\Delta f_1}{\Delta B} \cdot \frac{\Delta F_2}{\Delta F_1} \quad (15)$$

由式(15)可以看出，常规雷达的中放带宽 Δf_1 为兆赫量级，而脉冲多普勒雷达的接收系统有效带宽 ΔB 为数千赫量级，则 $\Delta f_1/\Delta B$ 得到 20~30 dB 改善。对常规脉冲雷达的干扰频谱宽 ΔF_1 为兆赫量级，如果对脉冲多普勒雷达的干扰频谱宽度 ΔF_2 也为兆赫量级时，则干扰机的等效干扰功率需增加 20~30 dB 才能达到原来的干扰效果。如果干扰机在瞄频技术上进行改进，使瞄频精度达到几十赫，则干扰频谱宽度可达数千赫量级，即 $\Delta B/\Delta f_2 \approx 0.3$ ，则 $K_p \approx 1$ 。也就是说，雷达在平均功率不变的条件下，通过相关接收处理，使雷达的有效接收带宽变窄，如果干扰也能够通过相干瞄频产生相干的干扰源，使干扰频谱宽度变窄，当两者改善的数量相同时，则干扰机不需要增加干扰功率，对脉冲多普勒雷达的干扰效果就能达到如同干扰常规脉冲雷达的干扰效果。现在的干扰瞄频技术水平已基本解决对脉冲多普勒雷达的干扰。

9.3 对合成孔径雷达干扰压制系数取值概念分析

合成孔径雷达是靠提高距离维的分辨力和角度维的分辨力使雷达成像的，合成孔径雷达距离维和角度维的数据有松散的联系，由图 12 可以看出，距离维与角度维没有紧密的联系，只要把距离维干扰了则成像功能即将散失。合成孔径的距离是采用脉冲压缩体制的，因此，干扰成像雷达的问题变成了干扰脉冲压缩雷达的问题了，参见 9.1 节。

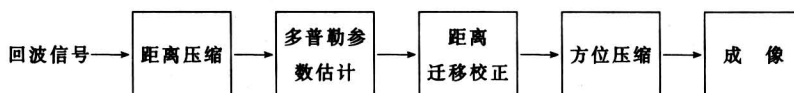


图 12 合成孔径雷达信号处理模型框图

Fig. 12 Signal processing composition diagram of SAR radar

9.4 对捷变频雷达的干扰技术

雷达的捷变频,是专门抗瞄频式干扰而设计的,对捷变频雷达的干扰,基本分三种类型:

1) 干扰机用做后面目标的掩护干扰 允许的测频和瞄频所需的延迟时间为

$$\tau = \frac{2a}{c} = \frac{d \cos \theta - r}{1.5 \times 10^8} \quad (16)$$

其中 c 为光速,如果 $d = 3 \sim 5$ km; $r = 1$ km, 算得 θ 与 τ 的关系见表 2。只要干扰机的瞄频时间小于 τ , 就能为目标进行掩护性干扰。

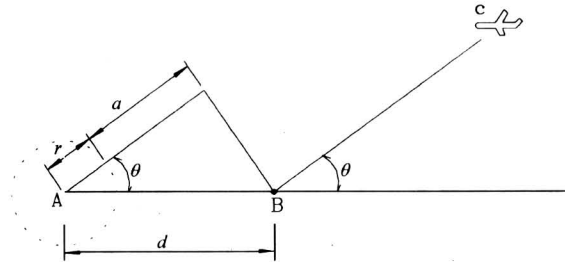


图 13 干扰机、被干扰雷达与掩护目标的相对位置

Fig. 13 Relative locations between jammer, victim radar and protected target

表 2 干扰机配置在被保护目标前面时不同距离允许的瞄频延迟时间表

Table 2 Allowed delay time for frequency set-on when jammer is positioned in front of protected target

$\theta / (^{\circ})$	0	30	40	50	60	70	75	78	d / km
$\tau / \mu\text{s}$	26.6	22	18.6	14	10	4.66	3.26	2.6	5
	13	10.6	8	6.1	3.3	0.18			3

目前,瞬时瞄频干扰源的瞄频时间,可以做到小于 $1 \mu\text{s}$ 。因此,对于掩护干扰机后面目标,干扰捷变频雷达的技术问题基本解决。

2) 自卫干扰机和用做掩护干扰机前面目标的干扰技术 由图 14 可看出,目标回波先收到,干扰信号后收到,干扰不能掩盖目标回波。因此,必须采用另一种瞄频技术。

如果雷达捷变频是采用若干个频,无规则的跳变,则干扰机瞄频系统,可采用记忆的方式,把每一个点频都存下来全部发射出去。它们干扰频谱

宽为 $n\Delta F$, 比对单一载频干扰时,干扰有效功率损失 n 倍,使干扰暴露距离 R 增大 $(n)^{1/4}$ 倍,仍然具有较好的干扰效果。

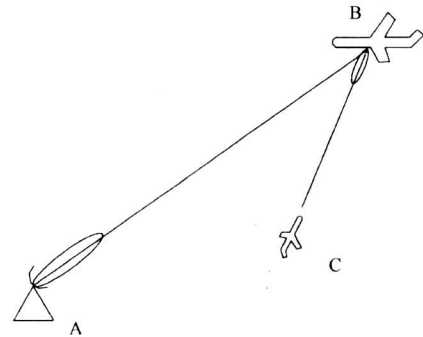


图 14 干扰机掩护它前面的目标示意图

Fig. 14 Location schematic diagram for jammer to protect target before it

3) 对连续随机捷变频雷达的干扰 掩护干扰机后面的目标仍然可以采用同步瞄频式干扰,它的干扰效果如同干扰固定载频的效果相当,如果掩护干扰机前面目标,只有采用宽带阻塞干扰,雷达跳频范围 F_a 越宽,干扰损失越大,这是干扰机应尽可能避免的一种干扰样式。

10 地对空干扰系统的发展前景

地对空干扰已从最初的对轰炸瞄准雷达干扰,发展成地对地;地对舰、地对空、地对太空的地对空干扰系统或称干扰系列。它具备对地面警戒雷达、对机载作战飞机雷达、对预警雷达、对精密制导武器上电子设备、对星载雷达等的干扰能力。在一定的场合它还可以掩护己方歼击航空兵作战。它可以称为一个攻防兼备的立体化干扰系列。

在海湾战争和北约空袭南联盟的战争中,是以强对弱、严重不平衡的战争,被攻击一方的地对空干扰机数量太少或没有,使防空兵器不能充分发挥作用,而空袭主要一方的空对地干扰使空载电子设备充分发挥了作用,单方面展示了电子战的威力,使它的作战损失率获得数万分之一效果。

如果被攻击的一方,有足够的地对空干扰系统数量和种类,在未发生战争前就干扰它的侦察卫星,使它不能用卫星探测到被攻击方军事设施布局,也许它就不敢冒然发动进攻。如果,它在摸不清情况下,发起进攻,损失也会严重一些。

如果在战争期间或战争前，能够把它的预警飞机雷达干扰了，使它变成“近视眼”，不能进行空中指挥来攻击被空袭方的拦截飞机。这样，它的攻击飞机损失率会增加，被入侵方的飞机损失率会降低。入侵者进入被空袭国家的领空内时，也可以受到地对空干扰系统的支援干扰，造成双方的雷达都变成“近视眼”的局面。没有雷达探测目标的情况下作战，弱国的能力未必比强国弱。再加上对精密打击武器的对抗和地面反雷达伪装的欺骗，最后将使入侵者的损失率由原来的数万分之一上升到百分之几，而被入侵者的损失率由百分之几十降到百分之几。如果能造成这种局面时，入侵者就会清醒一些，不敢轻易对别国进行空袭。

在防空体系中增加地对空干扰系统，花钱少

(约占防空系统经费的10%)，又能确保各类防空兵器充分发挥作用，使来袭者受到严重打击。这对增强发展中国家的防空能力有着良好的发展前景。

11 结束语

地对空干扰系统和系列，在现代化局部战争中具有攻、防兼备的干扰效果，可以形成从地面至太空全方位的立体干扰。特别是对发展中国家，在它的防空系统中若能增加地对空干扰系统，将会使它的防空兵器更能发挥作用，而且费用较低。大功率地对空干扰机稍加改进，可成为三维一体化电子战装备，还可能是过渡到高功率微波武器的桥梁，地对空干扰系统具有广阔的发展前景。

Ground-to-Air Radar Jamming System——Functions in Current Local Conflict and Its Development Trend

Zhang Xixiang

(No. 29 Electronic Research Institute of Information Industry Ministry, Chengdou 610036, China)

[Abstract] This paper describes the development of the ground-to-air jammer. Initially this equipment can only jam the bomb-aiming radar, but now it has evolved into a ground-to-air jamming system or series, which can jam a variety of radars, including airborne radar on combat aircraft, missile guidance radar, precise guidance radar, AWACS radar and satellite-borne radar, etc. The paper analyzes the jamming conception, methods and jamming station configuration against these types of radars.

The paper provides the conceptual analysis of the jamming suppression factors taken for jamming new types of radars, derives their mathematical expressions, and gives both the computer-simulated result and real-test result to further prove the confidence of the theoretical analysis.

The paper notes that in 2 current conflicts in 1990s, the intruders won the wars with very low loss rate (only several parts of ten thousands), because the other side had not equipped with the ground-to-air jamming systems. If they had got the ground-to-air jamming equipment deployed in their air defense system, they would have supported their air defense system to function well, reduced their own loss rate, increased the enemy's loss, and made intruders not to win so easily.

The paper concludes that the ground-to-air jamming system plays a very important role in the national defense. It has both defensive and offensive functions with its 3D jamming capabilities. Also it is very cost effective and quite suitable for the developing countries. The ground-to-air jamming system will have a bright future.

[Key words] ground-to-air jamming system; functions in current conflict; development trend