

文章编号: 1001 - 893X(2011)08 - 0056 - 05

跟踪干扰双曲线在跳频通信中的应用^{*}

方 超, 郝 威, 陈德志

(海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

摘 要: 针对中、低速跳频电台跟踪干扰问题, 通过对跟踪干扰方程的分析, 推导出了跟踪干扰无效区边界的一种新的表达式——跟踪干扰双曲线方程, 重点分析了该双曲线的特点及影响因素, 并讨论了跟踪干扰双曲线原理在实际装备中的应用及其扩展等问题。仿真与分析结果表明, 根据跟踪干扰双曲线选择抗干扰措施更直观、更简单。

关键词: 跳频通信; 跟踪干扰; 干扰双曲线; 干扰方程

中图分类号: TN914.41; TN97 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.012

Application of Following-jamming Hyperbola in Frequency-hopping Communications

FANG Chao, HAO Wei, CHEN De-zhi

(Electronic Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: By transfiguring the following-jamming equation of communication countermeasures, based on the issue of the anti-following-jamming about the slow frequency-hopping(FH) communication, a new equation or the following-jamming hyperbola equation for the boundary of the non - jamming area is deduced. The characteristics of the following - jamming hyperbola and the factors influencing the geometrical configuration are analysed, some practical problems about the application of the following-jamming hyperbola principle in the equipment and its extension are discussed. Simulation and analysis show that choosing anti-following-jamming measures by following-jamming hyperbola is more simple and direct than other methods.

Key words: FH communication; following-jamming; jamming hyperbola; jamming equation

1 引 言

跟踪式干扰是跳频通信的主要干扰威胁已经成为了一种共识。但是,跟踪干扰存在距离、速度等多维局限性,使得跟踪干扰只能在一定的地域内起作用。有关经典著作^[1,2]已经指出这一地域的几何数学关系为一椭圆。文献[3]详细推导了干扰椭圆的方程,并分析了该椭圆的特点和影响因素。从其分析的过程和结论可以看出,干扰椭圆直观地描述了干扰机的干扰阵位。但从抗干扰的角度出发,干扰

椭圆并不能直观地反映出抗干扰策略与跳频速率、工作模式及阵位的关系。针对这个问题,本文通过对跟踪干扰方程的变形分析,提出了跟踪干扰双曲线模型。

2 跳频通信中跟踪干扰双曲线的推导

设跳频通信装备使用全向天线(即跳频电台),干扰机到发射机的距离为 d ;接收机到发射机的距离为 d_e ;干扰机到接收机的距离为 d_j ;跳频周期为

^{*} 收稿日期:2011 - 04 - 07;修回日期:2011 - 05 - 31

T_h ; 干扰机需要的处理时间为 T_j , 且有 $(\eta T_h - T_j)c > 0$; η 为一常数, 代表每个跳频周期中未被干扰时间(即转发时延)所占的比例, 其值小于 1; c 为电磁波的速度。要实现跟踪干扰, 则根据干扰椭圆理论^[4-6]必须满足以下关系式:

$$\frac{d + d_j}{c} + T_j \leq \frac{d_c}{c} + \eta T_h \tag{1}$$

式(1)经整理得:

$$d_j - d_c \leq (\eta T_h - T_j)c - d \tag{2}$$

对于对抗双方的实际装备和地理位置, 式(2)右边各参数均为固定值, 即 $d_j - d_c$ 小于等于一个常数, 若取等号且右边参数即 $(\eta T_h - T_j)c - d$ 满足一定的条件时, 则式(2)描述了一个以跳频发射机和干扰机为焦点的双曲线。根据式(2)的表达式可以看出, 式(2)描述的是一个区域, 满足式(2)的区域为跟踪有效区, 反之则为跟踪无效区。因此, 本文把式(2)中“ $=$ ”成立时所描述的双曲线称为跟踪干扰双曲线。下面根据不同条件来推导跟踪干扰双曲线。

以干扰机所在位置为坐标原点 $O(0,0)$, 干扰机与发射机的连线为 x 轴, 则发射机的坐标为 $B(d, 0)$, 设接收机的坐标为 $A(x, y)$, 如图 1 所示, 则:

$$d_j = \sqrt{x^2 + y^2}, d_c = \sqrt{(x - d)^2 + y^2}$$

令 $(\eta T_h - T_j)c = D$, 把 d_c, d_j 代入式(2)并经一定的数学运算得:

$$2dx - (D - d)^2 - d^2 \leq 2(D - d)\sqrt{(x - d)^2 + y^2} \tag{3}$$

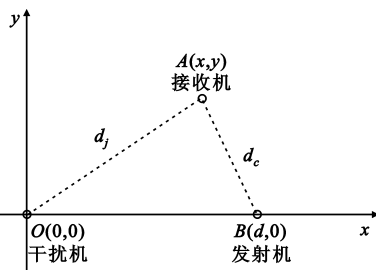


图 1 干扰机与通信电台的几何配置
Fig.1 The geometrical configuration between the transmitter, receivers and the jammer

下面对 $(D - d)$ 进行讨论。

(1) 当 $D - d > 0$ 的情况

因为当 $x \leq \frac{(D - d)^2}{2d} + \frac{d}{2}$ 时, 式(3)恒成立, 这就意味着此时不存在干扰无效的区域。因此, 只分

析 $x > \frac{(D - d)^2}{2d} + \frac{d}{2}$ 的部分。

当 $d < D < 2d$ 时, 对式(3)两边同时平方后整理可得:

$$\frac{(x - \frac{d}{2})^2}{\frac{(D - d)^2}{4}} - \frac{y^2}{\frac{D(2d - D)}{4}} \leq 1 \tag{4}$$

当 $2d - D < 0$ 时, 对式(3)两边同时平方后整理可得:

$$\frac{(x - \frac{d}{2})^2}{\frac{(D - d)^2}{4}} + \frac{y^2}{\frac{D(D - 2d)}{4}} \geq 1 \tag{5}$$

由对式(5)的分析可知, 不满足式(5)的区域为跟踪无效区, 该区域为一个椭圆面, 但该椭圆面不满足 $x > \frac{(D - d)^2}{2d} + \frac{d}{2}$ 的条件, 所以此时不存在跟踪无效区。因此, 式(4)决定了当 $D - d > 0$ 时的跟踪无效区, 即为双曲线右支的右侧区域, 如图 2 中阴影部分所示。

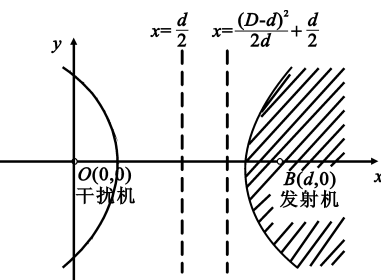


图 2 $d < D < 2d$ 时的干扰无效区
Fig.2 The non-jamming area ($d < D < 2d$)

(2) $D - d < 0$ 的情况

因为当 $x > \frac{(D - d)^2}{2d} + \frac{d}{2}$ 时, 式(3)恒不成立, 即该条件下的所有区域为跟踪无效区域。当 $x \leq \frac{(D - d)^2}{2d} + \frac{d}{2}$ 时, 对式(3)两边同时平方后整理可变形为

$$\frac{(x - \frac{d}{2})^2}{\frac{(D - d)^2}{4}} - \frac{y^2}{\frac{D(2d - D)}{4}} \geq 1 \tag{6}$$

由式(6)可得, 双曲线的左支与直线 $x = \frac{(D - d)^2}{2d} + \frac{d}{2}$ 之间的区域不能满足式(3)成立的条件, 因此该区域为跟踪无效区。

综上可得,当 $D - d < 0$ 时的干扰无效区为双曲线

线 $\frac{(x - \frac{d}{2})^2}{\frac{(D-d)^2}{4}} - \frac{y^2}{D(2d-D)} = 1$ 的左支的右侧部分,

如图 3 中阴影部分所示。

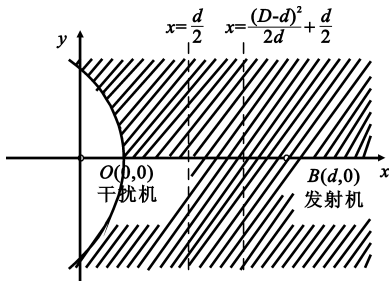


图 3 $D - d < 0$ 时的干扰无效区
Fig.3 The non - jamming area ($D - d < 0$)

3 跟踪干扰双曲线的特点分析

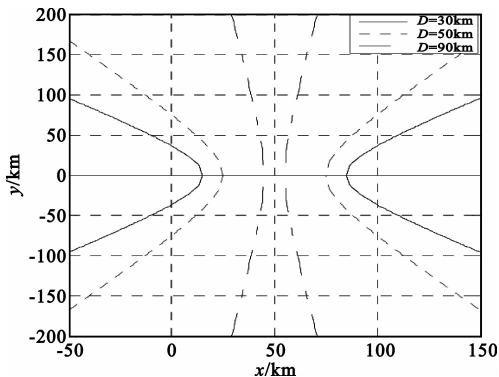
因为当 $D = d$ 时,由式(3)可以很容易得出其边界线为直线 $x = \frac{d}{2}$,但是这种情况不易保持。因此,

跟踪干扰无效区的主要边界是双曲线 $\frac{(x - \frac{d}{2})^2}{\frac{(D-d)^2}{4}} - \frac{y^2}{D(2d-D)} = 1$ 的两支,即:当 $0 < D < d$ 时为其左支,当 $d < D < 2d$ 时为其右支。下面对该双曲线的特点进行分析,并抽象成一个数学问题,与具体的装备无关。

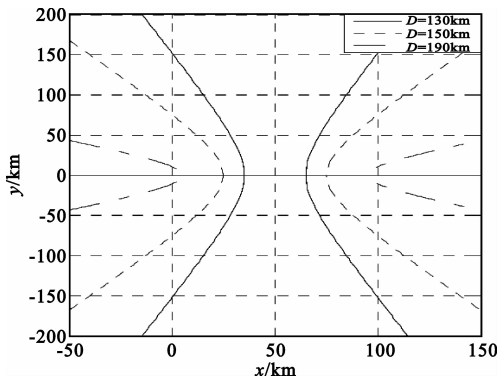
由跟踪干扰双曲线的表达式可以看出,影响双曲线的因素主要为通信发射机与干扰机之间的距离 d 以及与跳频周期有关的 $D = (\eta T_h - T_j)c$ 两个因素,其关系曲线如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可以看出,当 d 一定时,双曲线的中心不变化,为直线 $x = \frac{d}{2}$ 。图 4(a)说明了当 $D < d$ 时,双曲线的实轴随着 D 的增大而减小,渐进线的斜率 k 随着 D 的增大而变大。当 $D \rightarrow d$ 时双曲线的实轴趋于 0,且 $k \rightarrow \infty$,此时双曲线趋近于直线 $x = \frac{d}{2}$ 。图 4(b)说明了当 $d < D < 2d$ 时,双曲线的实轴随着 D 的增大而增大,直到趋于 d 为止,而渐进线的斜率 k 随着 D 的增大而变小,直到趋于 0。结合图 2 和图 3 可得: D 的增大会导致干扰无效区的减小。

又因为 $D = (\eta T_h - T_j)c$,所以, T_h 的增大会导致干扰无效区的减小,即跳频速率的减小会导致干扰无效区的减小。反之,提高跳频速率可以增大干扰无效的区域,即提高跳速有助于增强抗跟踪干扰的能力。



(a) $D < d$

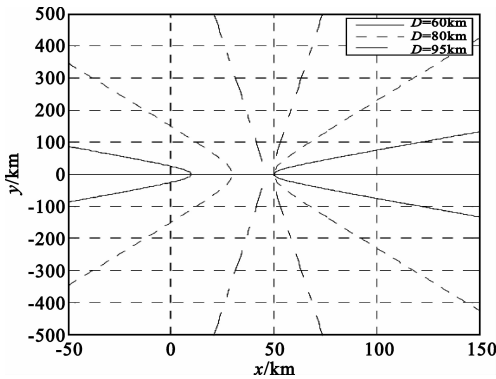


(b) $d < D < 2d$

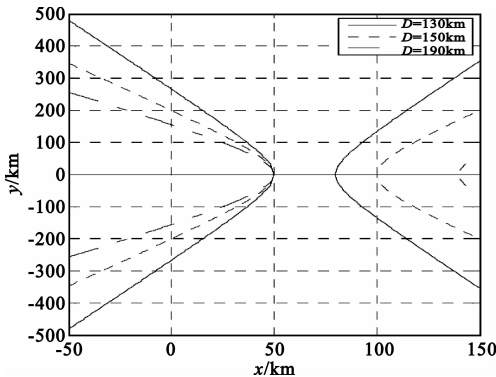
图 4 $d = 100$ km 时 D 对曲线的影响
Fig.4 The influence of D on the hyperbola ($d = 100$ km)

由图 5 可以看出,在 D 一定时即跳频速率不变的情况下,双曲线的中心随 d 的增大而向右移动。图 5(a)说明了当 $d < D < 2d$ 时,双曲线与 x 轴的右交点固定在 $(\frac{D}{2}, 0)$ 位置不变化,左交点随着 d 增大逐渐向右移动,双曲线的渐近线的斜率 k 随 d 的增大而变大,双曲线向直线 $x = \frac{D}{2}$ 趋近。当 $d = D$ 时,斜率 $k = \infty$,此时双曲线变化为直线 $x = \frac{D}{2}$ 。图 5(b)说明了当 $d > D$ 时,双曲线与 x 轴的左交点固定在 $(\frac{D}{2}, 0)$ 位置不变化,右交点随着 d 增大逐渐向右移动,双曲线渐近线的斜率 k 随 d 的增大而减小。通过对图 2、图 3 及图 5 的分析可得, d 的增大会导致干扰无效区的增大,即增大发射机与干扰机之间

的距离也有助于抗跟踪干扰。



(a) $d < D < 2d$



(b) $d > D$

图 5 $D = 100\text{ km}$ 时 d 对曲线的影响

Fig.5 The influence of d on the hyperbola($D = 100\text{ km}$)

由图 2~5 可看出,跟踪干扰的边界线的变化以直线 $x = \frac{d}{2}$ 为极限,即当左支(右支)无限趋近于直线 $x = \frac{d}{2}$ 后,则会变为以右支为边界(左支)。但是,跟踪干扰无效区总是处于所求边界的右侧。

由以上分析可知,适当提高跳频速率或增大通信发射机与干扰机之间的距离都有助于抗跟踪干扰,而且跳频速率 $\frac{1}{T_h}$ 和通信发射机与干扰机之间的距离 d 在一定条件下可以互换,即增大 d 与提高跳频速率可以得到同样的效果。因此,当需要兼顾信号带宽、通话质量等因素而不便于改变跳频速率的情况下,通过调整通信平台的阵位也能实现抗跟踪干扰。

总之,在选择抗干扰措施时,对 d 和 T_h 的调整可以以跟踪干扰双曲线为依据,把相应参数调整到我通信区域落入干扰无效区域即可。

4 跟踪干扰双曲线在跳频通信抗干扰中的应用

从以上分析可知,抗干扰措施的选取与通信平台阵位、跳频参数及通信工作模式有很大的关系。具体结论如下。

(1) 跳频速率与抗干扰的关系。因为 $D = (\eta T_h - T_j)c$,所以对通信方来说, D 的变化可以通过改变跳频速率(即跳频周期 T_h)的方式来实现。比如:当需要满足 $D - d < 0$ 时,可以采取提高跳频速率的方法。反之则可以减小跳频速率,但跳速的减小应当以 $D = 2d$ 为极限,因为由对式(5)的分析可知,当 $D > 2d$ 时不存在干扰无效的区域,这是对通信抗干扰方最为不利的情况。当跳频速率远大于干扰机的反应速度时,即 $\eta T_h - T_j < 0$ 成立时式(1)不成立,此时无跟踪有效区,即无论通信阵位如何布置,只要通信功率足够就能实现有效的通信。该方法的最大优点是调整速度快,只要电台的技术体制满足要求,就能迅速地适应情况的变化。

(2) 通信阵位与抗干扰的关系。在不改变跳频速率的情况下,通过改变通信平台的阵位也能实现有效的抗干扰。主要措施有两种:一是调整发射平台与干扰机之间的距离 d ,使干扰无效区覆盖我通信区域;二是接收平台采取规避措施,主动移动至敌干扰无效区域内进行通信。也可以采取通信收、发平台同时移动的方式。

(3) 当干扰机为升空平台时,这种几何关系从二维上升到三维空间,跟踪干扰双曲线变化为双曲面。因为海上编队通信时,所有的通信平台处于同一水平面上,所以总能找到跟踪干扰无效的区域。由分析可知,只要通信的收、发双方所在区域不被所计算出的双曲面所分割,则能实现有效的通信。如当干扰机与发射机的距离满足 $d \leq D < 2d$ 时,双曲面所覆盖的区域为干扰无效区域,如图 6 所示(图中阴影为跟踪干扰双曲面所覆盖的区域)。

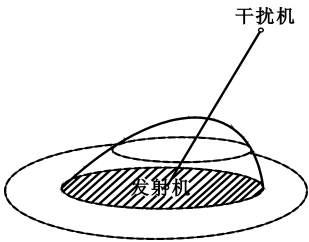


图 6 空中干扰示意图

Fig.6 Illustration of air jamming

(4)当通信的一方(如指挥舰)只需发送信息(即为单工工作模式)时,即使通信的接收方(如队员舰)处于跟踪干扰有效区内也能实现有效的通信。这时,通信发射方必须采用定向通信,且必须保证干扰机位于通信的发射覆盖区之外,否则极易被跟踪干扰。

(5)跳频接收机和发射机的角色是互换的,但是,这种角色的互换相当于通信阵位的变化,所以以上结论仍然成立。由此还可以得出,在进行通信对抗前,各阵位都应当跟据自己所在的位置计算出相应的跟踪无效区,以便于战时参考使用。

5 结束语

本文研究了跳频通信与跟踪干扰之间新的关系表达式及其特点和具体应用。与其它模型相比,跟踪干扰双曲线模型更直观地描述了跟踪干扰无效区与跳频速率、通信阵位及单/双工工作模式之间的关系。从跟踪干扰双曲线的推导过程可以看出,以干扰机为原点建立的坐标系有利于从功率、距离、速度3个方面研究干扰无效的区域。在遂行作战任务前,通信方应充分掌握对抗双方的态势、地理位置、装备性能等情况,合理地布置通信装备的几何位置,采取综合性措施,以便在已有跳频通信装备抗跟踪干扰性能基础上进一步增强抗跟踪干扰的效果。同理,干扰方应采取相反的措施才能取得好的跟踪干扰效果。

参考文献:

[1] R C 狄克逊. 扩展频谱系统[M]. 北京:国防工业出版社,1982.
Dixon R C. Spread Spectrum Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press,1982. (in Chinese)

[2] Torrieri D. Principles of Military Communication Systems [M]. Massachusetts: Artech House,1981.

[3] 姚富强,张毅. 干扰椭圆分析与应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2005,6(1):7-10.
YAO Fu-qiang, ZHANG Yi. Analysis and Application of Jamming ellipse[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 6(1): 7-10. (in Chinese)

[4] 郭伟. 跳频通信的干扰方式研究[J]. 电子科技大学学报,1996,25(9):451-455.
GUO Wei. Researches on Jamming Methods of FH/SS Communications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1996, 25(9): 451-455. (in Chinese)

[5] 崔晓鹏,胡中豫,孟凡超. 对短波跳频通信中跳速的思考[J]. 通信对抗,2010(1):12-16.
CUI Xiao-peng, HU Zhong-yu, MENG Fan-chao. Considered on Hopping Speed in Short-wave Frequency-Hopping Communication [J]. Communication Countermeasures, 2010(1):12-16. (in Chinese)

[6] Don J Torrieri. Fundamental Limitations on Repeater Jamming of Frequency-Hopping Communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1989, 17(4):569-575.

作者简介:

方超(1983—),男,重庆黔江人,工程师,现为海军工程大学硕士研究生,主要研究方向为通信电子防御;

FANG Chao was born in Qianjiang, Chongqing, in 1983. He is now an engineer and also a graduate student of Naval University of Engineering. His research concerns electronic defense of communication.

Email:316039449@qq.com

郝威(1964—),男,内蒙古人,副教授,主要研究方向为通信组织与指挥;

HAO Wei was born in Inner Mongolia Autonomous Region, in 1964. He is now an associate professor. His research concerns communication organizing and command.

陈德志(1982—),男,福建人,工程师,现为海军工程大学硕士研究生,主要研究方向为通信组织与指挥。

CHEN De-zhi was born in Fujian Province, in 1982. He is now an engineer and also a graduate student. His research concerns communication organizing and command.

勘 误

本刊 2011 年第 51 卷第 7 期第 69 页 3.2.2 节第 11 行公式中“ $\arctanh$ ”应为“ artanh ”,特此更正。

本刊编辑部