文章编号：2095-4980(2013)02-0234-05

分布式干扰机对联合战术信息分配系统干扰应用

申　振，康　健，周长征

(中国人民解放军 63880 部队，河南 洛阳 471003)

摘　要：从通信干扰的角度研究了分布式干扰机的干扰性能和应用特点，通过分析分布式干扰机布设密度与通信被压制概率的关系，以及在 Simulink 模型上仿真分布式干扰机对联合战术信息分配系统(JTIDS)的干扰效果，探讨了分布式干扰机对 JTIDS 系统进行有效干扰的应用方法，得出的一些有益结论，对实战应用具有一定的参考意义。

关键词：联合战术信息分配系统；分布式干扰；压制概率；干扰机布设密度

中图分类号：TN972^{+}.22　　**文献标识码：**A

Application analysis of distributed jamming in Joint Tactical Information Distribution System

SHEN Zhen，KANG Jian，ZHOU Chang-zheng

(Unit 63880 of PLA，Luoyang Henan 471003，China)

Abstract：From the perspective of communication countermeasure，the performance and application characteristic of distributed jamming are analyzed，as well as the relation between the distributed density and jamming probability. The Joint Tactical Information Distribution System(JTIDS) is carried out by using Simulink，and the effect of distributed jamming on JTIDS system is simulated. The methods of effective jamming of distributed jammer on JTIDS system are discussed. Some beneficial conclusions are given，which will be useful in the war.

Key words：Joint Tactical Information Distribution System；distributed jamming；blanket jamming probability；distributed density

美军的联合战术信息分配系统(JTIDS)是一个集通信、导航、识别等功能于一体的高容量数字信息分发系统，由于其采用了大量的通信新技术，使得其具有很强的抗干扰性，能在各种恶劣的条件下保持通信的可靠性和稳定性。目前已有文献资料分析了远程大功率干扰对 JTIDS 系统的干扰效果，但都不理想[1]，本文研究分析了多个小功率分布式干扰机抵近干扰的应用方法。分布式干扰是将众多体积小、价格便宜的小型干扰机散布在干扰目标周围，代替远程大功率干扰机对敌方电子设备进行有效干扰[2]，依其距离近、数量多和方位宽广等方面的优势来实现对干扰目标的有效干扰和压制。本文从通信干扰的角度，分析了分布式干扰的功率合成、通信压制概率及布设密度计算，并通过建模仿真，探讨了分布式干扰机对 JTIDS 系统进行有效干扰的应用方法。

1　JTIDS 系统干扰仿真模型实现

JTIDS 系统抗干扰能力主要来自信号跳频(51 个频点)、扩频和信道纠错编码等。其中信号扩频采用循环码移位键控(Cyclic Code Shift Keying，CCSK)调制方式，通过 32 位循环扩频码实现对每 5 bit 信息字符扩频调制，在数据段中所使用的伪随机序列是周期移位，信道纠错编码有(70,75)检错编码、里所(Reed-Solomon，RS)编码、交织码与双脉冲编码 4 种不同的差错控制编码方式。本

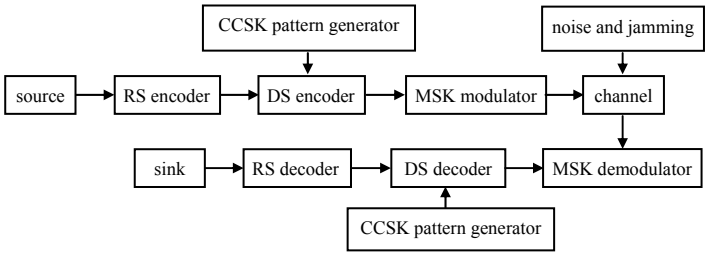

Fig.1 Block diagram of the system
图 1　系统整体结构图

收稿日期：2012-04-24；修回日期：2012-06-04

文基于 JTIDS 基本原理,运用 Simulink 对 JTIDS 系统进行建模[3],仿真系统的大体结构见图 1。

仿真系统由信源模块、RS 信道编码模块、CCSK 扩频模块、跳频模块、信道模块、解跳模块、CCSK 解扩模块和 RS 解码模块组成,信道部分包含最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)调制与解调,干扰场景的模拟通过对信道中加入了分布式干扰机对目标跳频频点形成的干信比来实现。仿真主要模块介绍:

1) 信道纠错

系统采用 Simulink 已有的(31,15)RS 编码/解码模块[4],在由 31 个字符组成的大组中,由于干扰或传播等原因,即便在 16 个字符无法判决或有 8 个字符判决错误的情况下,信道译码时依然能纠正过来。

2) CCSK 扩频/解扩模块

CCSK 扩频模块见图 2,其功能是把 5 bit 的不同字符通过 subsystem1 子模块转换成不同的 32 bit 的 M 序列,并串行输出。CCSK 解扩模块的基本原理是运用M序列自相关性的特殊性,让信号分别与本地产生的 32 路不同循环位的大M序列相关性计算,判决出相关性最大的一路为解调信号,再根据其相应的循环位解调出相应的信号。其每一路判决的实现过程见图 3。CCSK 是基于循环移位的 32 进制直序扩频,它的带宽仅为传统二进制扩频系统的 1/5,这使得它特别适合于频谱宽度限定而又要求一定处理增益的场合。扩频时,按照时隙的直扩伪码序列图案,每 5 bit 信息去控制特定的 32 位伪码循环移位。JTIDS 采用的这种直序扩频方式,提高了该系统抗连续波干扰、窄带噪声干扰和欺骗干扰的能力,同时也有助于减少网间干扰[5]。

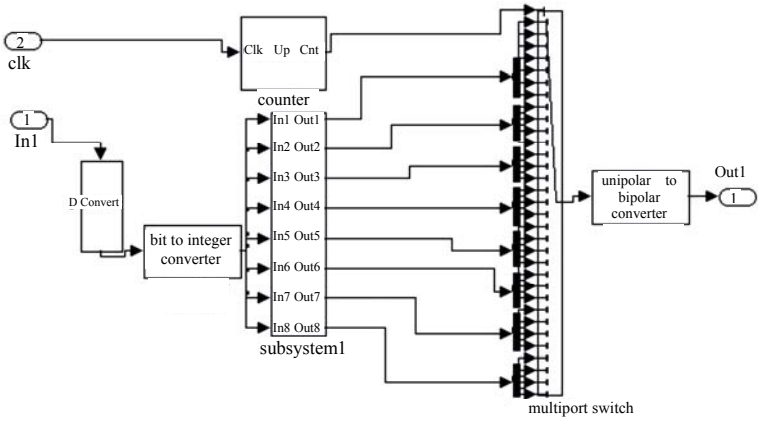

Fig.2 Module of CCSK DS encoder

图 2 CCSK 扩频模块

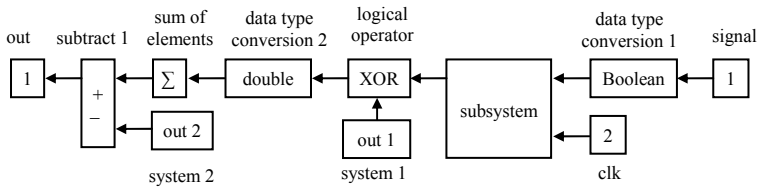

Fig.3 Module of CCSK DS decoder

图 3 每一路的判决模块

3) 干扰模块

对于跳频通信系统,主要采用的干扰方式是跳频引导干扰和多频点阻塞式干扰。跳频引导干扰实施的前提是干扰方信道侦察机能够侦测截获信号并对其实施快速引导干扰,但在实际作战时要做到这一点是有相当难度的。在本系统中采用多频点阻塞式干扰,不考虑跳频模块,通过对单频点干扰效果的仿真,推算出压制部分频点达到预定干扰效果的条件。

2　分布式干扰机干扰性能理论分析

2.1 分布式干扰机干扰功率合成

假设 N 个分布式干扰机在某一个频点进行干扰时,采用的干扰信号均为连续波(Continuous Wave, CW),且各信号独立均匀分布,则接收机瞬时接收复包络为[6]:

$$r(t)=\sum_{i=0}^{N-1}a_i\exp(\mathrm{j}\theta_i) \tag{1}$$

式中:a_i 是第 i 个接收信号幅度;θ_i 是第 i 个接收信号相位。瞬时功率 P_{CW} 为:

$$P_{\mathrm{CW}}=|r(t)|^2=\left|\sum_{i=0}^{N-1}a_i\exp(\mathrm{j}\theta_i)\right|^2 \tag{2}$$

平均接收功率为:

$$E_{a,\theta}[P_{\mathrm{CW}}]=E_{a,\theta}\left[\left|\sum_{i=0}^{N-1}a_i\exp(\mathrm{j}\theta_i)\right|^2\right]=\overline{\left(a_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_0}+a_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_1}+\cdots+a_N\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_N}\right)\times\left(a_0\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\theta_0}+a_1\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\theta_1}+\cdots+a_N\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\theta_N}\right)}\approx$$
$$\sum_{i=0}^{N-1}\overline{a_i^{\,2}}+2\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{i,j\neq i}^{N}r_{ij}\overline{\cos(\theta_i-\theta_j)} \tag{3}$$

式中：$E_{a,\theta}[\ ]$为数学期望值，表示 a_i 和 θ_i 所有可能值的总体平均；上划线表示在时间上平均；r_{ij} 是幅度相关系数，定义为 $r_{ij}=E_a\left[a_i a_j\right]$；$\theta_j$ 是第 j 个接收信号相位。

由于各干扰信号独立均匀分布，其到接收机信号幅度和相位均为独立分布，当干扰机数量足够多时，式(3)中 $2\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{i,j\neq i}^{N} r_{ij}\overline{\cos(\theta_i-\theta_j)}$ 项的值约为 0，故：$E_{a,\theta}[P_{\mathrm{CW}}]\approx\sum_{i=0}^{N-1}a_i^2$。

表 1 是在分布式干扰机干扰信号幅度都相等的简化模型基础上，选择不同干扰个数仿真计算的合成功率结果[7]。从表 1 可以看出，采用分布式干扰时，相位随机变化，总功率约等于各分布式干扰机干扰功率之和，且干扰源数量越多，干扰总功率越接近于各分布式干扰机干扰功率之和。

表1 功率的合成计算结果(幅度相等)

Table1 Code of power synthesis

number of jamming	simulation value/W	theoretical value/W
1	0.500 0	0.500 0
10	4.374 0	5.000 0
100	50.545 4	50.000 0
500	250.680 0	250.000 0
1 000	500.869 9	500.000 0

2.2 通信被压制概率计算

假设在接收点对敌方通信进行压制所需的有效干扰功率为 P_0，且与干扰机彼此之间的距离相比，干扰区面积很大。用地面波干扰时，到达接收点的干扰场强与干扰作用距离 r_j 的 4 次方成反比，接收机受到的有效干扰功率 P 可按式(4)计算：

$$P=\frac{AP_{jl}B_s}{r_j^4 B_{jl}} \tag{4}$$

式中：A 为与电波传播条件有关的常数；P_{jl} 为一部干扰机的发射功率；B_s 为接收机的通频带；r_j 为干扰发射机至接收机间的距离；B_{jl} 为一部干扰机所占有的干扰带宽。

令 $\begin{cases}C=\dfrac{AP_{jl}B_s}{B_{jl}}\\ r_j=r\end{cases}$，则式(4)可简写成：$P=\dfrac{C}{r^4}$。

根据前面的假设，要使敌方通信被压制，在敌通信接收机输入端的有效干扰功率应该保证 $P_\Sigma\geqslant P_0$。设 $P_\Sigma<P_0$ 的概率为 W'，即通信不能被压制的概率为 W'，那么通信被压制的概率 W 为：

$$W=1-W' \tag{5}$$

假定 k 台干扰机放置在一起，则临界情况下的干扰半径 r_k 为：

$$r_k^4=k\frac{C}{P_0} \tag{6}$$

假定以接收机所在位置为原点，以 r_k 为半径作圆，见图 4。

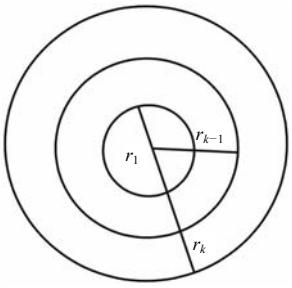

Fig.4 Jamming probability of distributed jamming

图 4 分布式干扰压制通信的概率示意图

令 $P_\Sigma<P_0$ 的第 1 个条件是：r_1 为半径的圆内的干扰机数目不超过 1 部，如此类推，$P_\Sigma<P_0$ 的第 k 个条件是：在 r_{k-1} 为半径的圆外，r_k 为半径的圆内干扰机数目不超过 k–1 部，当以上 k 个条件都满足时可以保证 $P_\Sigma<P_0$。第 k 个条件满足的概率是：

$$V_k(0)+V_k(1)+\cdots+V_k(k-1)=\sum_{m=0}^{k-1}V_k(m) \tag{7}$$

式中 V_k 为 $P_\Sigma<P_0$(即接收机不被压制)的概率函数，则 $W'=\prod_{k=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{k-1}V_k(m)$。通信被压制的概率 W 为：

$$W=1-W'\geqslant 1-\prod_{k=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{k-1}V_k(m) \tag{8}$$

假定干扰机分布是随机的，投入某区域内的干扰机数目与面积成正比，而与其形状和位置无关，则接收机不被压制的概率 $V_k(m)$ 呈泊松分布[8]，可以由式(9)计算：

$$V_k(m)=\frac{(\lambda)^m\,\mathrm{e}^{-\lambda}}{m!} \tag{9}$$

式中 $\lambda=n_0'S_k$，n_0' 为某个频段 B_{jl} 内落到单位面积(每平方千米)上干扰机的数目，S_k 为压制的干扰区域面积，且

$S_k=\pi\left(r_k^2-r_{k-1}^2\right)=\dfrac{\pi\sqrt{C}}{\sqrt{P_0}}\left(\sqrt{k}-\sqrt{k-1}\right)$。

令 $y=n_0^{'}\pi\dfrac{\sqrt{C}}{\sqrt{P_0}}$，则有：

$$y=n_0^{'}\pi\sqrt{\frac{AP_{jl}B_s}{B_{jl}P_0}},\quad V_k(m)=\frac{y^m\left(\sqrt{k}-\sqrt{k-1}\right)^m}{m!}\mathrm{e}^{-y\left(\sqrt{k}-\sqrt{k-1}\right)} \tag{10}$$

又因为 $W'=\prod_{k=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{k-1}V_k(m)$，此时通信被压制的概率 W 为：$W\geqslant 1-W'$，则可以得到 y~W 的关系仿真曲线，见图 5。

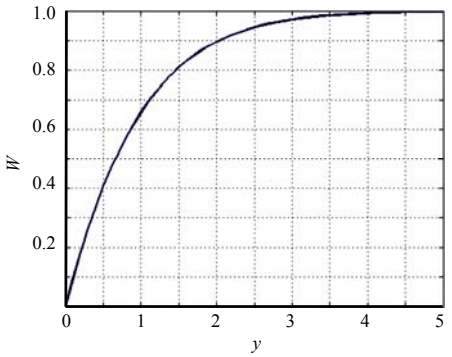

Fig.5 Relation curve of y and W
图 5 y~W 的关系曲线

2.3 干扰机布设密度的计算

若将整个拦阻频段 B_j 等分为若干个子频段 B_{jl}，则在频段 B_j 内单位面积上干扰机的平均数 n_0 为：

$$n_0=n_0^{'}\frac{B_j}{B_{jl}} \tag{11}$$

这样，当干扰目标为地空通信链路，已知发射机的功率 P_s、通信距离 r_s 及干扰所需压制系数 k_s 时，对敌方通信进行压制所需的有效干扰功率为：

$$P_0=\frac{Lk_sP_s}{r_s^2} \tag{12}$$

式中 L 为与电波传播条件有关的常数。

由此，就可以大致地估算出所需的干扰机密度 n_0(频段 B_j 内单位面积上干扰机的平均数)：

$$n_0=y\frac{B_j\sqrt{Lk_sP_s}}{\pi r_s\sqrt{AP_{jl}B_{jl}B_s}} \tag{13}$$

式中 y 为与干扰机压制通信信号成功概率有关的常数，可通过查询概率关系曲线图得到。

由式(13)可看出，当其他条件一定时，干扰机布设密度的 2 次幂和压制系数成正比，由此可以推算出一定条件下，干扰机布设密度与目标接收机接收信号干信比的关系，进而利用前文介绍的仿真模型得出干扰机布设密度与 JTIDS 系统误码率的关系。

3　对 JTIDS 系统干扰仿真与分析

为阻断一定地面作战区域内 JTIDS 地空通信链路，对作战区域投放一定密度的干扰机干扰地面 JTIDS 接收终端。假定空中 JTIDS 终端发射功率为 200 W，通信距离 100 km，地面 JTIDS 终端天线架高为 10 m，干扰机发射功率为 8 W，天线架高为 0.5 m，干扰目标为 51 个频点中的一个，作战成功率目标值在 95%以上，不考虑干扰带宽失配损耗和天线增益的前提下，利用前文理论分析和仿真模型，得出干扰机密度 n 与地面接收机接收到的信号误码率关系仿真曲线见图 6。从图 6 中可以看出，在前面特定的应用中，完全压制 JTIDS 系统的 1 个跳频频点通信，需要的干扰机密度约为 0.8 台/m^3，此时干信比约为 12.5 dB，实战中要对 JTIDS 进行有效干扰需同时压制 20 个频点，若每台干扰机干扰 1 个频点，则所需干扰机密度为 16 台/m^3。分布式干扰机一般通过飞机或者火炮进行布放，每平方千米布放 16 台显然密度过大，布放困难，如对干扰机加以改造，在增加发射功率的前提下，采用多目标干扰的方式，每台干扰机干扰多个频点，降低所需干扰机数量和布放难度，比如每台干扰机同时干扰 10 个频点，对每个频点干扰功率为 8 W，则平均每平方千米布放 1.6 台干扰机，就可以达到既定干扰效果。

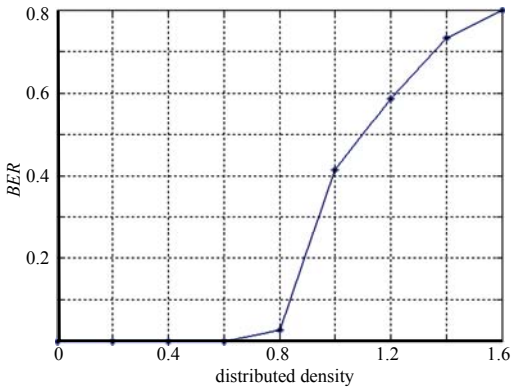

Fig.6 Relation curve of the jammer density and bit error rate
图 6　干扰机密度与系统误码率关系曲线

4 结论

JTIDS 系统在美军通信装备中地位举足轻重，研究如何对其进行有效干扰具有重大意义。本文重点分析了对 JTIDS 进行干扰时，分布式干扰机布设密度计算和干扰效果评估方法，使用的数据是根据战场设想而拟定的，实战中根据双方实际对抗态势和装备性能，可进一步修正。本文根据已知资料进行建模仿真，尽可能逼近 JTIDS 的实际方案，使分布式干扰机对 JTIDS 干扰性能的仿真结果具有一定的可信度。

参考文献：

[1] 孙颖. JTIDS 系统及其干扰研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.
[2] 《电子战技术与应用—通信对抗篇》编写组. 电子战技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
[3] 申振,徐志军,王华力. JTIDS 系统抗干扰性能的 Simulink 仿真与分析[J]. 信息与电子工程, 2008,6(5):359-362.
[4] 刘武周，杨建波，周瑞. 基于 Simulink 的联合战术信息分发系统仿真[J]. 信息与电子工程, 2010,8(1):15-18.
[5] 范小麟,马大伟,胡焰智,等. 基于 Simulink 的 JTIDS 抗干扰性能仿真[J]. 信息与电子工程, 2007,5(2):100-103.
[6] Theodore S Rappaport. 无线通信原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
[7] 周扬,王昌宝,吴志勇. 分布式干扰对 TH-PPM-UWB 通信干扰的仿真分析[J]. 航空电子技术, 2010,41(2):13-18.
[8] 王红星,曹建平. 通信侦察与干扰技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.

作者简介：

申 振(1980-)，男，河南省遂平县人，硕士，工程师，主要研究方向为通信对抗.email: szsavage@163.com.

康 健(1977-)，男，河南省洛阳市人，本科，高级工程师，主要研究方向为通信对抗.

周长征(1981-)，男，河南省周口市人，硕士，工程师，主要研究方向为通信对抗.