

# OPNET 仿真平台下典型作战环境对 弹载通信干扰效果影响研究

钱立志, 张杰, 陈栋

(陆军炮兵防空兵学院 高过载弹药制导控制与信息感知实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 为了解和掌握典型作战环境下弹载通信干扰机的干扰效果, 利用 OPNET 仿真平台建立弹载通信干扰模型, 并在被干扰对象进程中刻画了典型作战环境下的信号传输模型, 最后当跳频电台的发射天线高架时, 对东南沿海和西南边境等两种典型作战环境进行了仿真验证。仿真结果表明: 东南沿海环境下, 干扰机下降过程中受到障碍物的阻挡时, 干扰信号无法到达部分电台的接收端, 导致电台接收端的信噪比有所提高; 西南边境环境下, 干扰机下降过程中由于山区地形的遮挡, 对超短波电台的干扰信号阻挡较多, 干扰效果不明显, 而对短波电台的阻挡较少, 被干扰的程度较大, 使得短波电台出现了丢包。随着干扰机的进一步下降, 对短波电台的干扰信号也被阻挡, 使得对短波的干扰程度降低, 其丢包率和误码率均逐步降低。相关结论对充分发挥典型作战环境下弹载通信干扰机的作战效能具有借鉴意义。

**关键词:** 弹载通信干扰机; 典型作战环境; 干扰效果; 环境模型; 信号传播损耗

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.005

**中图分类号:** TN978+.4      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)08-0028-10

## Impact of Typical Operational Environment on Projectile-carried Communication Jamming Effect on OPNET Simulation Platform

QIAN Li-zhi, ZHANG Jie, CHEN Dong

(High Overload Ammunition Guidance and Control and Information Perception Laboratory, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China)

**ABSTRACT:** To understand and master the jamming effect of projectile-carried communication in typical combat environment, the projectile-carried communication jamming model was constructed in OPNET simulation platform and the signal transmission model in typical combat environment was depicted in the process of the jammed object. Finally, when the transmitting antenna of frequency hopping radio was high elevated, two typical combat environments, such as southeast coast and southwest border, were simulated and verified. The simulation results showed that in the southeast coastal environment, when the jammer was blocked by obstacles during the descent process, the jamming signal cannot reach the some radio receivers, which caused the increase of signal-to-noise ratio at the radio receivers; in the southwest border environment, due to the occlusion of mountain terrain during the descent process, the jammer blocked the VHF radio signal more, and the jamming effect was not obvious; but blocked the HF radio less, and the degree of jamming was larger, which made the HF radio lose its packet. With the further decrease of jammer, the jamming signal to HF radio was blocked, which reduced the degree of jamming to HF, and decreased the

收稿日期: 2020-01-12; 修订日期: 2020-03-25

Received: 2020-01-12; Revised: 2020-03-25

作者简介: 钱立志(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为弹药信息化。

**Biography:** QIAN Li-zhi (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: ammunition informatization.

packet loss rate and bit error rate. Relevant conclusions can be used for reference to give full play to the operational efficiency of projectile-carried communication jammer in typical combat environment.

**KEY WORDS:** projectile-carried communication jammer; typical operational environment; jamming effect; environment model; signal propagation loss

弹载通信干扰机是指利用弹药作为承载平台,通过炮弹的空中飞行而“飞”至预定位置,主要对敌跳频通信电台进行干扰<sup>[1-5]</sup>。干扰机在干扰敌跳频电台的过程中,干扰信号的传播必将受到作战环境的影响,从而导致传播损耗也各不相同。本文通过 OPNET 仿真平台<sup>[6-7]</sup>构建典型作战环境影响下的弹载通信干扰信号传播模型,研究典型作战环境对弹载通信干扰机干扰效果的影响,为弹载通信干扰机的作战使用提供参考。

### 1 弹载通信干扰系统在 OPNET 仿真平台下的模型构建

为了突出重点,区分主次,便于模型建立,假定电台和干扰机采用的天线类型均为鞭形天线<sup>[8]</sup>,电台只考虑地波传输方式,即电台只考虑直射波传播方式<sup>[9-12]</sup>。在 OPNET 仿真平台下搭建的弹载通信干扰系统模型如图 1 所示,该模型包含一部弹载通信干扰机,一组短波跳频通信电台收发端,一组超短波跳频通信电台收发端<sup>[13-14]</sup>。

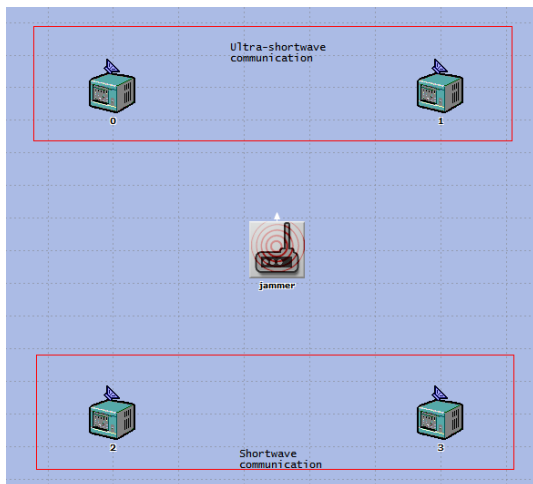


图 1 弹载通信干扰系统模型  
Fig.1 Model of projectile-carried communication jamming system

#### 1.1 干扰机第一层模型

干扰机第一层模型由信号源、短波信号发射端及天线、超短波信号发射端及天线组成,如图 2 所示。其中,信号源用于产生符合一定规律的短波波段和超短波波段的干扰信号;短波信号发射端及天线用于将

短波波段的干扰信号发射出去,并依托天线模块对信号发射增益进行刻画;超短波信号发射端及天线用于将超短波波段的干扰信号发射出去,并依托天线模块对信号发射增益进行刻画。

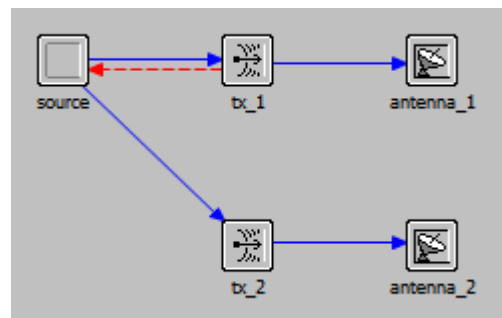


图 2 干扰机第一层模型  
Fig.2 First-layer model of jammer

#### 1.2 干扰机第二层模型

干扰机第二层模型即为 OPNET 中的进程模型,是以有限状态机为基础进行构建的。如图 3 所示,有限状态机包括初始态、闲置态、工作态、停止态。其中,初始态主要用于仿真开始时对变量进行初始化,并读取干扰机性能参数;闲置态为各状态之间的过渡阶段,主要是等待不同的发生条件,从而跳转至其他状态;工作态为干扰机在一定干扰模式下的工作状态,即按照某规律生成并发送相应波段的干扰信号;停止态为干扰机的工作停止状态。

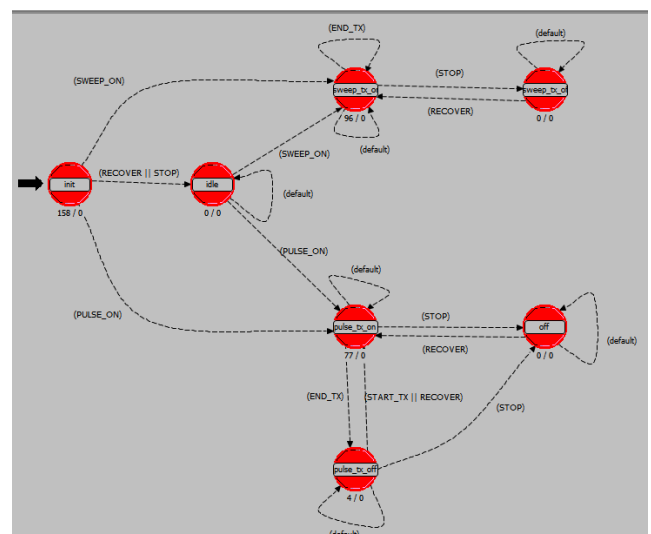


图 3 干扰机第二层模型  
Fig.3 Second-layer model of jammer

### 1.3 节点参数配置

干扰机主要参数配置：1) 干扰机的下降速度；2) 对短波电台进行干扰时的干扰带宽；3) 短波波段干扰带宽的起始频率；4) 短波波段的干扰功率；5) 对超短波电台进行干扰时的干扰带宽；6) 超短波波段的干扰功率。具体如图4所示。

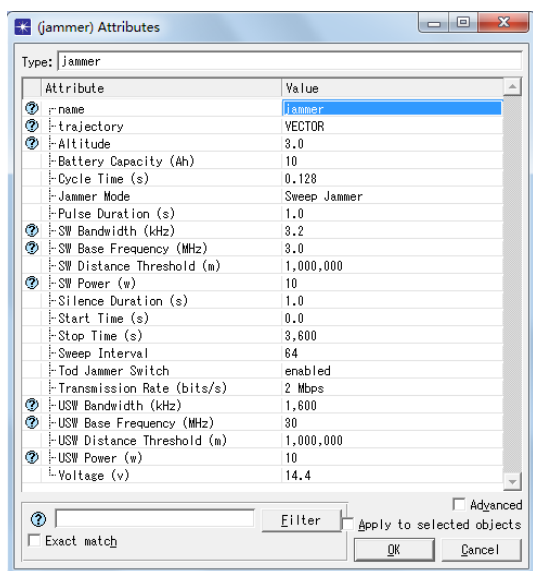


图4 干扰机主要参数

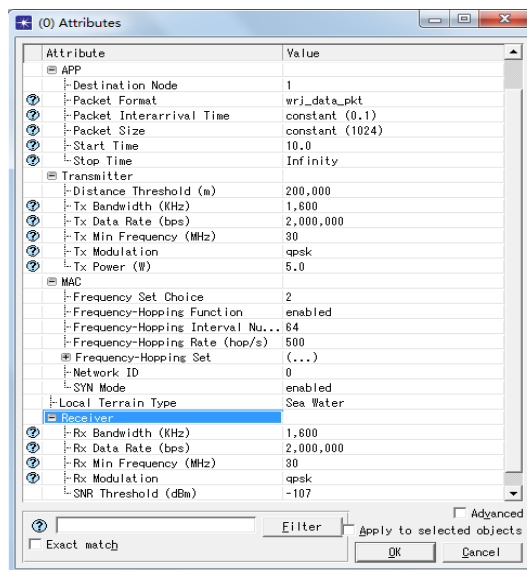
Fig.4 Jammer's main parameters

短波、超短波电台主要参数配置：1) 电台发射端的工作带宽；2) 电台发射端工作带宽的起始频率；3) 电台的调制方式；4) 电台的发射功率；5) 电台接收端的工作带宽；6) 电台接收端工作带宽的起始频率；7) 电台的信号接收灵敏度；8) 电台的物理层参数配置，包括电台进行通信时所用的频率表号、跳频间隔、跳速、跳频频率表。根据电台的实际属性，可确定电台的频率表数以及每个频率表中包含的频率数。通信双方电台只有所选用的频率表和频率跳变规律一致时方可通信。具体如图5所示。

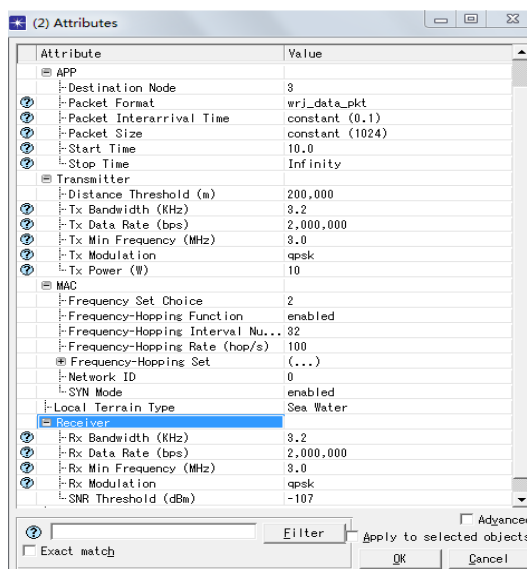
## 2 弹载通信干扰机典型作战环境对信号传播的影响及其在OPNET仿真平台中的模拟

### 2.1 弹载通信干扰机的典型作战环境

弹载通信干扰机的典型作战环境分为东南沿海和西南边境两大类。其中东南沿海地区主要有海水、潮湿地区、沿海沙地等三种地面类型；西南边境地区主要有淡水、干燥地、山区等三种地面类型<sup>[15]</sup>。



a 超短波电台参数配置



b 短波电台参数配置

图5 超短波电台和短波电台参数配置

Fig.5 Parameters configuration of VHF (a) and HF (b) radio

### 2.2 典型作战环境对信号传播的影响

自由空间传播条件下的路径损耗  $L_f$  (dB)<sup>[16]</sup>：

$$L_f = 20 \lg \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg r \quad (1)$$

式中， $\lambda$  为波长，m； $r$  为电波传输距离，km； $f$  为频率，MHz。

由于工作环境的不同，信号不可能永远在自由空间中传播，而是伴随着不同的能量损耗。由于不同类型地面的电参数是不相同的，因此，按照电台天线低架和天线高架两种情况进行区分<sup>[17]</sup>，而每种情况下又分别包含东南沿海和西南边境两种典型作战环境。

#### 2.2.1 天线低架

当电台天线低架时，以东南沿海环境下的潮湿地区

为例，电波传播的路径损耗：

$$L_b = 29.45 + 20 \lg f + 20 \lg r - 20 \lg |W| \quad (2)$$

$$|W| = \frac{2 + 0.3x}{2 + x + 0.6x^2} \quad (3)$$

$$x = \frac{\pi r}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{361 + 0.36\lambda^2}}{400 + 0.36\lambda^2}; \lambda$$

为波长，m；r 为电波传播距离，m。

西南边境环境下的山区环境时，电波传播的路径损耗：

$$L_b = 29.45 + 20 \lg f + 20 \lg r - 20 \lg |W| \quad (4)$$

$$|W| = \frac{2 + 0.3x}{2 + x + 0.6x^2} \quad (5)$$

$$x = \frac{\pi r}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{16 + 0.0036\lambda^2}}{25 + 0.0036\lambda^2} \quad (6)$$

### 2.2.2 天线高架

当电台天线高架时，路径损耗：

$$L_b = 120 + 40 \lg r - 20 \lg (h_1 \cdot h_2) \quad (7)$$

由式(8)可以看出，天线高架时的路径损耗不受具体地表参数的影响，也即此时不需要考虑当地的地表环境。

## 2.3 典型作战环境对信号传播的影响在 OPNET 仿真平台中的模拟

典型作战环境对信号传播的影响主要体现在接收功率上，因此这种影响体现在接收机模块中。该模块负责计算节点在接收到其他节点发射的无线信号后的一系列参数，对通信节点间进行无线信号接收时的通信端口特性进行模拟，包括收音机支持的信道数目、报文格式、发射速率、各信道的频段、调制编码方式（包括 BPSK、DPSK、QPSK、16QAM、2FSK、MSK、GMSK 等）、发射功率、扩频码等。如图 6 所示，按照计算顺序主要包括以下过程。

1) 接收天线增益，计算接收机指向发射节点方向上的天线增益大小。

2) 接收信号功率：计算信号经过无线信道的传输和衰减后到达接收机上的功率大小，该部分计算时需要考虑不同信道环境和不同通信模式下的信号衰落规律，结合对应的信道传播模型计算其衰落程度。针对当前设计的短波和超短波通信网，各节点间主要采用地波传输。因此，构建了短波和超短波的地波传输信号衰落模型，针对天线低架、天线高架以及节点所处的地形地貌特征，基于不同的传播模型进行信号路损的计算，从而为收音机模块提供接收信噪比的计算依据。目前，在通信电台接收机的接收功率管道阶段采用 wireless\_power\_mt()函数进行接收功率的计算，其中，对于短波和超短波的地波传输衰减大小通过 ultra\_shortwave\_power\_loss\_calculate()函数进行计算，如图 7 所示。

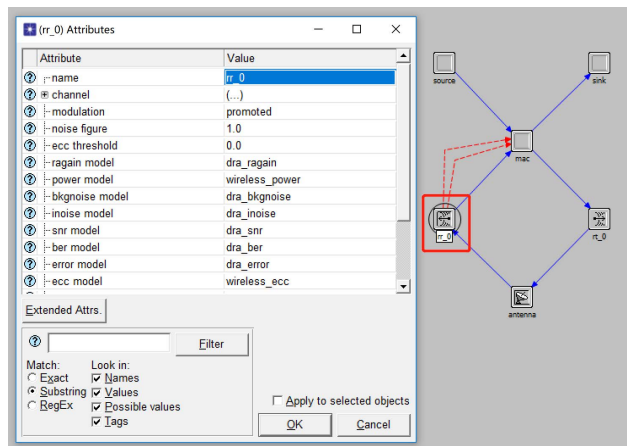


图 6 电台接收机节点模型  
Fig.6 Node model of radio receiver

## 3 仿真场景设计及结果分析

### 3.1 syn\_hop\_high\_ant\_southeast 场景

该场景包括一部匀速降落的弹载通信干扰机、短波通信电台收发端 2、3 和超短波通信电台收发端 0、1，干扰机在地面的投影位置处于短波电台组和超短波电台组的中间。整个网络部署在东南沿海地形上，两对通信电台均开启了 ToD 同步和跳频功能，采用天线高架的方式。其中，电台 0 和电台 2 处于沿海沙地区域，电台 1 和电台 3 处于海水区域。具体如图 8。

#### 3.1.1 场景配置

该场景中，超短波电台 0 和短波电台 2 处于沿海沙地地形，超短波电台 1 和短波电台 3 处于海水区域，其他参数配置与 1.3 节保持一致。

#### 3.1.2 统计结果

根据 OPNET 中自带的 TIREM4 地形模型，弹载通信干扰机到各电台节点的地形起伏情况如图 9—12 所示。由图 9—12 可知，干扰机逐步下降到地面高度后，与四部电台之间均有地形的遮挡，尤其是与电台 0 和 1 的衰减路损偏大，使得干扰机最后逐步下降到地面高度后，对电台 0 和 1 的干扰效果不明显。

由图 13—20 的结果可见，由于开启了同步模式且同步头的投递率在 50% 以上<sup>[18-20]</sup>，使得干扰机一直保持干扰状态，发送吞吐量为固定值。由于电台的同步头和数据包均受到了干扰，因此一部分数据信号未能同步，而无法传输，一部分数据信号被干扰机干扰而丢弃，导致全网的业务接收吞吐量明显低于发送吞吐量。当干扰机在匀速下降的过程中遇到障碍物的阻挡时，针对部分电台的干扰信号无法到达电台接收端，使得电台接收端的信噪比有所提高。

```

268 double ultra_shortwave_power_loss_calculate(double tx_center_freq, double prop_distance, double tx_ant_gain, double rx_ant_gain, int antenna_mode, in
269 {
270     double W;
271     double X, X1, X2, X3;
272     double path_loss_db = 0.0;
273     double path_loss;
274     double b;
275     double W1_r1, W1_r2, W2_r1, W2_r2, W1_r1_r2, W2_r1_r2;
276     double r1, r2;
277     double lambda;
278
279     FIN(ultra_shortwave_power_loss_calculate(double tx_center_freq, double prop_distance, double tx_ant_gain, double rx_ant_gain, int antenna_mode, i
280
281     // Build antenna low
282     if(antenna_mode == 0)
283     {
284         // Tx:sea to RX:sea
285         if(tx_terrain_type == 0 && rx_terrain_type == 0)
286         {
287             x = (VOSC_NA_PI * prop_distance * tx_center_freq)/(80.0 * sqrt(1 + 9 * pow(1.0/tx_center_freq, 2)));
288             W = (2.0 + 0.3 * x)/(2.0 + x + 0.6 * x * x);
289             path_loss_db = 29.45 + 20 * log10(tx_center_freq / 1.0e6) + 20 * log10(prop_distance / 1000.0) - 20 * log10(W);
290         }
291
292         // Tx:ground to RX:sea
293         if((tx_terrain_type == 2 || tx_terrain_type == 3 || tx_terrain_type == 4 || tx_terrain_type == 5) && rx_terrain_type == 0)
294         {
295             lambda = 1.0 / tx_center_freq;
296             r1 = prop_distance / 2.0;
297             r2 = prop_distance - r1;
298
299             X1 = (VOSC_NA_PI * r1 * tx_center_freq) * sqrt(81.0 + 0.0144 * lambda * lambda) / (100.0 + 0.0144 * lambda * lambda);
300             X2 = (VOSC_NA_PI * r1 * tx_center_freq) / (80.0 * sqrt(1 + 9 * lambda * lambda));
301             X3 = (VOSC_NA_PI * prop_distance * tx_center_freq) / (80.0 * sqrt(1 + 9 * lambda * lambda));
302
303             W1_r1 = (2.0 + 0.3 * X1)/(2.0 + X1 + 0.6 * X1 * X1);
304             W1_r2 = (2.0 + 0.3 * X2)/(2.0 + X2 + 0.6 * X2 * X2);
305             W2_r1_r2 = (2.0 + 0.3 * X3)/(2.0 + X3 + 0.6 * X3 * X3);
306
307             b = 20 * log10(W1_r1 * W2_r1_r2 / W2_r1);
308             path_loss_db = 29.45 + 20 * log10(tx_center_freq / 1.0e6) + 20 * log10(prop_distance / 1000.0) - b;
309         }
310
311         // Tx:sea to RX:ground
312         if(tx_terrain_type == 0 && (rx_terrain_type == 2 || rx_terrain_type == 3 || rx_terrain_type == 4 || rx_terrain_type == 5))
313         {
314             lambda = 1.0 / tx_center_freq;
315             r1 = prop_distance / 2.0;
316             r2 = prop_distance - r1;
317
318             X1 = (VOSC_NA_PI * r2 * tx_center_freq) / (80.0 * sqrt(1 + 9 * lambda * lambda));
319             X2 = (VOSC_NA_PI * r2 * tx_center_freq) * sqrt(81.0 + 0.0144 * lambda * lambda) / (100.0 + 0.0144 * lambda * lambda);
320             X3 = (VOSC_NA_PI * prop_distance * tx_center_freq) * sqrt(81.0 + 0.0144 * lambda * lambda) / (100.0 + 0.0144 * lambda * lambda);
321
322             W2_r2 = (2.0 + 0.3 * X1)/(2.0 + X1 + 0.6 * X1 * X1);
323             W1_r1_r2 = (2.0 + 0.3 * X2)/(2.0 + X2 + 0.6 * X2 * X2);
324             W1_r1_r2 = (2.0 + 0.3 * X3)/(2.0 + X3 + 0.6 * X3 * X3);
325
326             b = 20 * log10(W2_r2 * W1_r1_r2 / W1_r2);
327             path_loss_db = 29.45 + 20 * log10(tx_center_freq / 1.0e6) + 20 * log10(prop_distance / 1000.0) - b;
328         }
329
330         // Tx:ground to RX:ground
331         if((tx_terrain_type != 0 && rx_terrain_type != 0))
332         {
333

```

图7 接收功率和损耗在 OPNET 内核中的代码表示  
 Fig.7 Code representation of received power and loss in OPNET kernel

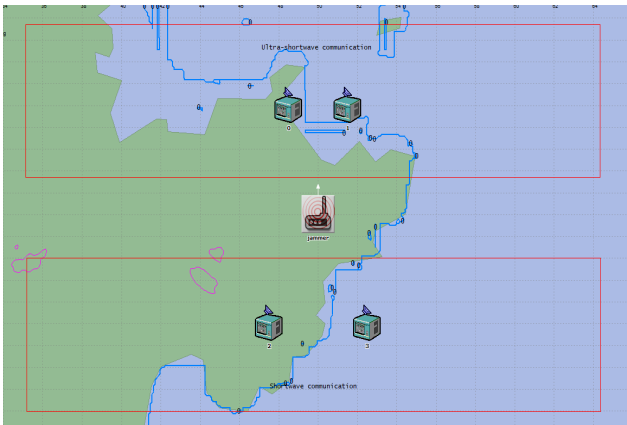


图8 东南沿海场景模拟  
 Fig.8 Southeastern coast scene simulation

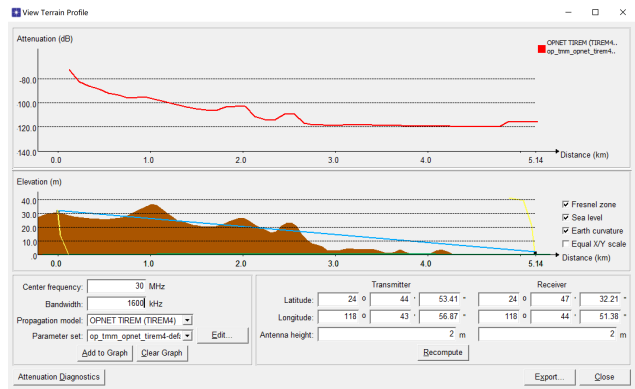


图10 干扰机到节点1的地形起伏  
 Fig.10 Topographic relief from jammer to node 1

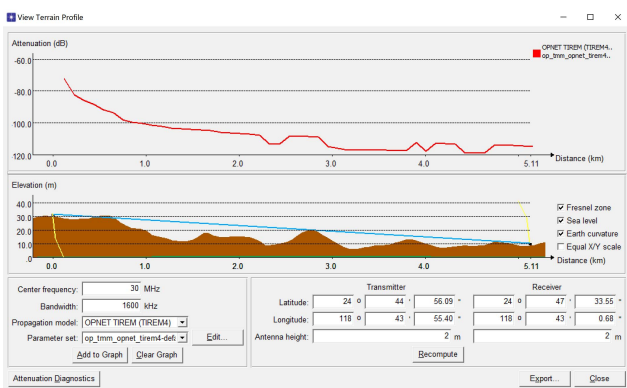


图9 干扰机到节点0的地形起伏  
 Fig.9 Topographic relief from jammer to node 0

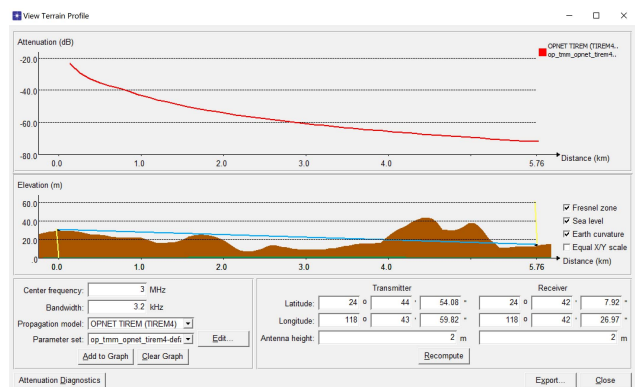


图11 干扰机到节点2的地形起伏  
 Fig.11 Topographic relief from jammer to node 2

### 3.2 syn\_hop\_high\_ant\_southwest 场景

该场景包括一部匀速降落的弹载通信干扰机、短

波通信电台收发端 2、3 和超短波通信电台收发端 0、1，干扰机在地面的投影位置处于短波电台组和超短波电台组的中间。整个网络部署在西南山区地形上，两对通信电台均开启了 ToD 同步和跳频功能，采用



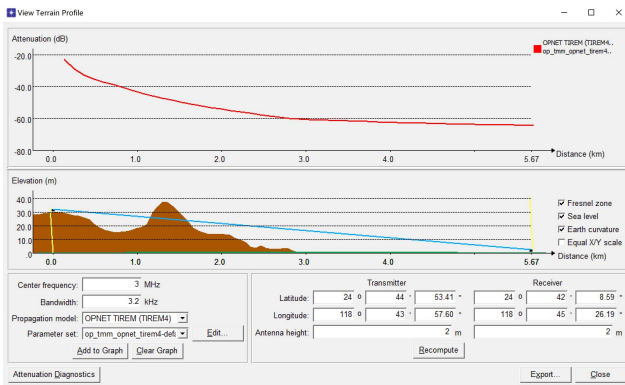


图 12 干扰机到节点 3 的地形起伏  
Fig.12 Topographic relief from jammer to node 3

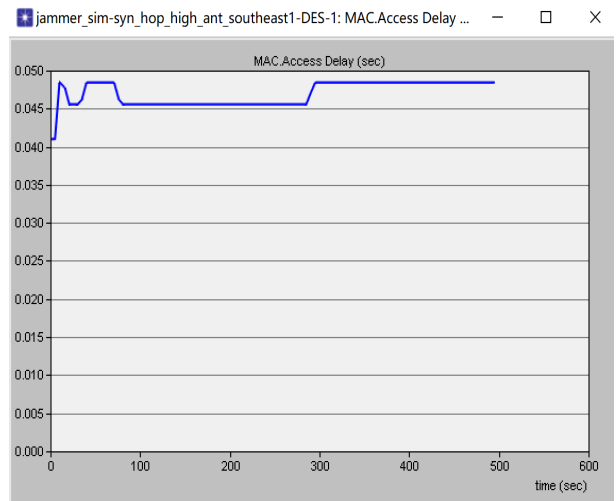


图 15 全网无线信道接入时延  
Fig.15 Wireless channel access delay over the whole network

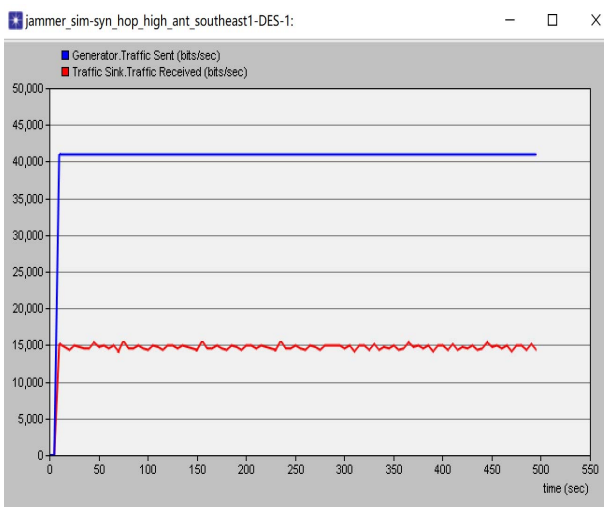


图 13 全网业务收发吞吐量  
Fig.13 Transmit and receive throughput of network-wide services

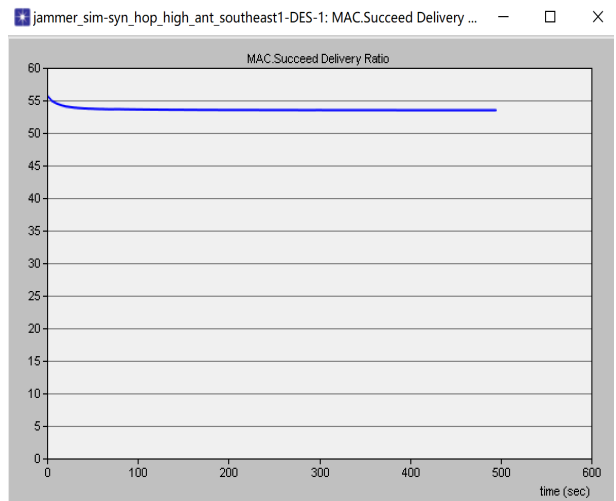


图 16 全网 ToD 同步头报文的投递率  
Fig.16 Delivery rate of ToD synchronized header message in the whole network

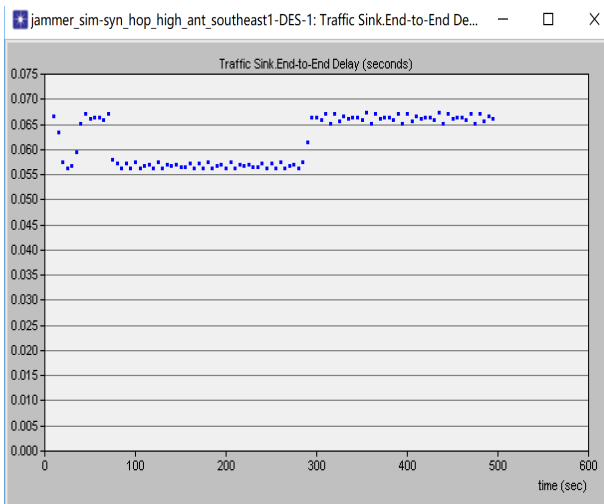


图 14 全网业务端到端时延  
Fig.14 End-to-end delay of network-wide services

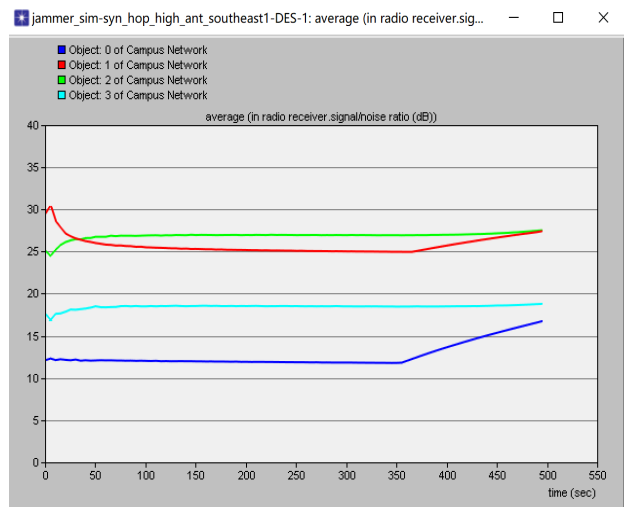


图 17 信噪比  
Fig.17 Signal-to-noise ratio

天线高架的方式。如图 21 所示。

### 3.2.1 场景配置

该场景中，超短波电台和短波电台均处于山区地

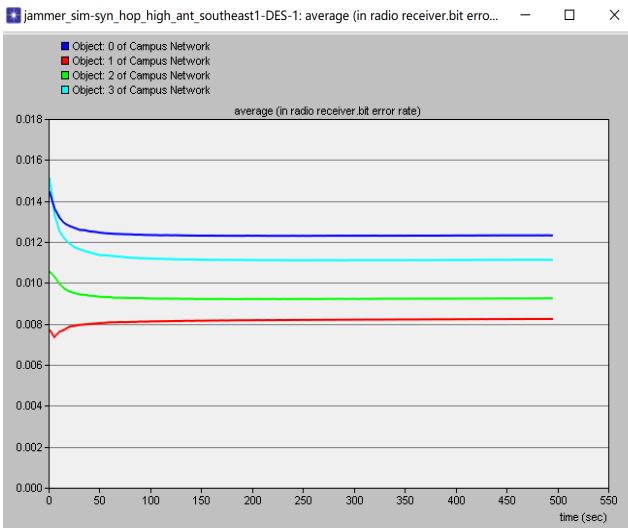


图 18 误码率  
Fig.18 Bit error rate

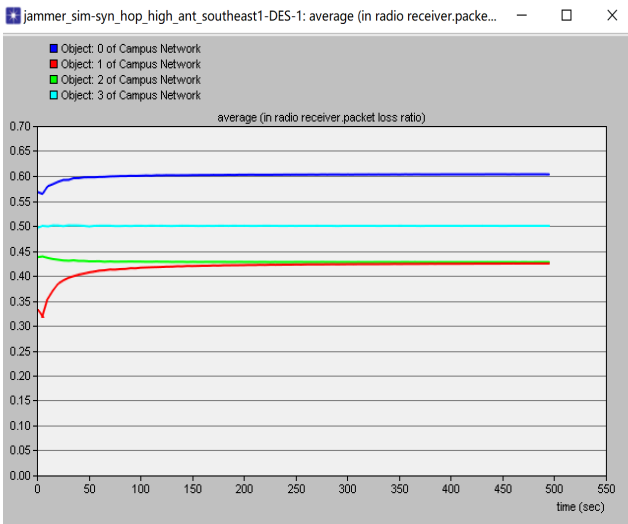


图 19 丢包率  
Fig.19 Packet loss rate

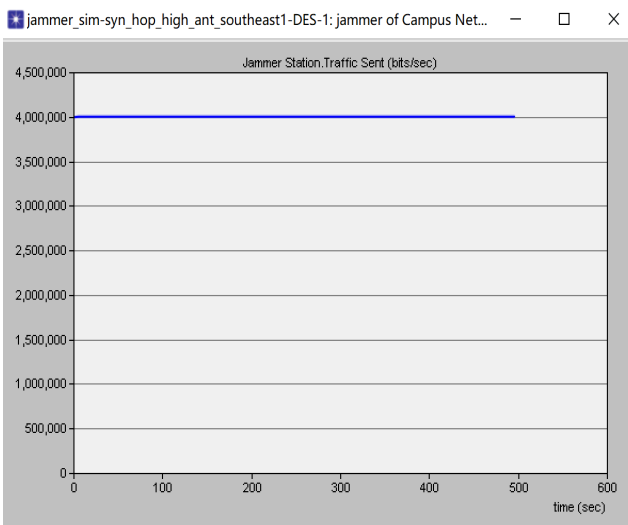


图 20 干扰机的发送吞吐量  
Fig.20 Transmit throughput of jammer

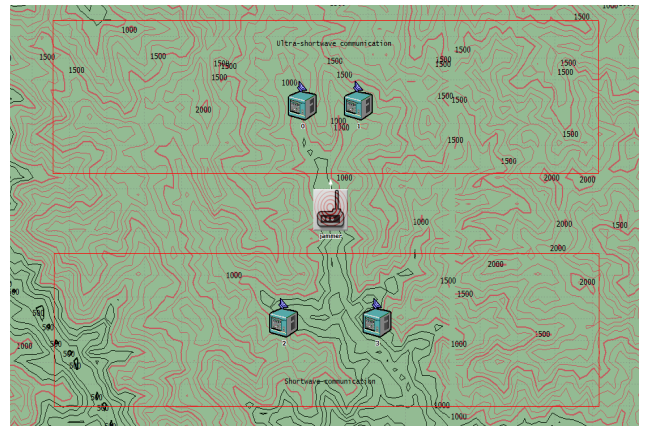


图 21 西南边境场景模拟  
Fig.21 Scene simulation of southwestern border

形, 其他参数配置与 1.3 小节保持一致。

### 3.2.2 统计结果

根据 OPNET 中自带的 TIREM4 地形模型, 弹载通信干扰机到各电台节点的地形起伏情况如图 22—25 所示。由干扰机到各电台的地形剖面图可见, 干扰机逐步下降到地面高度后, 在该地形影响下, 干扰机到节点 0 和 1 的干扰信号衰减比上一地形情况衰减更大, 因而对节点 0 和 1 的干扰效果更差, 对节点 2 和 3 的干扰信号衰减与上一地形情况相差不太大, 由

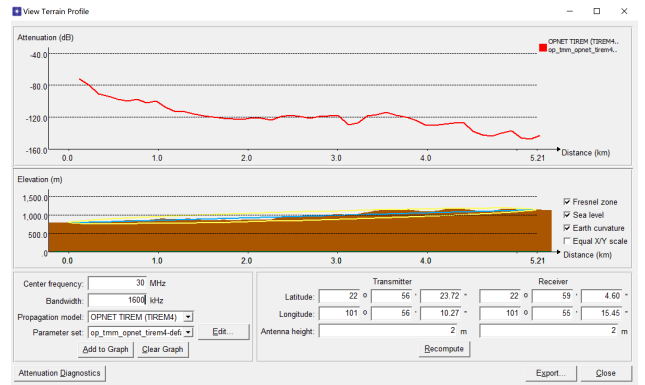


图 22 干扰机到节点 0 的地形起伏  
Fig.22 Topographic relief from jammer to node 0

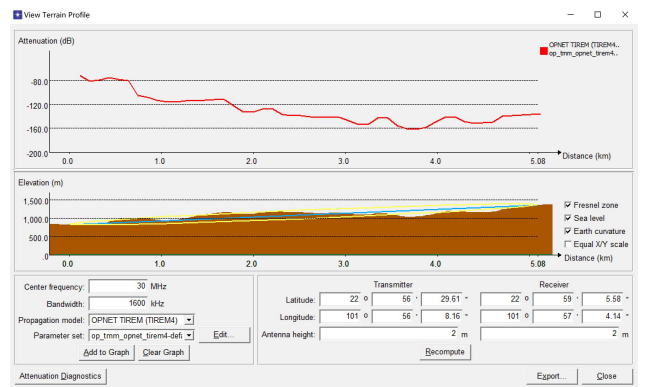


图 23 干扰机到节点 1 的地形起伏  
Fig.23 Topographic relief from jammer to node 1

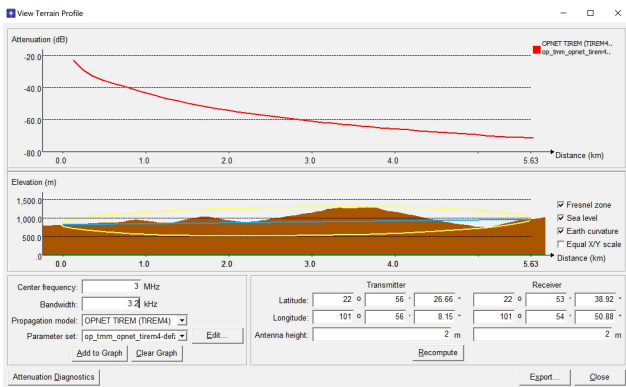


图 24 干扰机到节点 2 的地形起伏  
Fig.24 Topographic relief from jammer to node 2

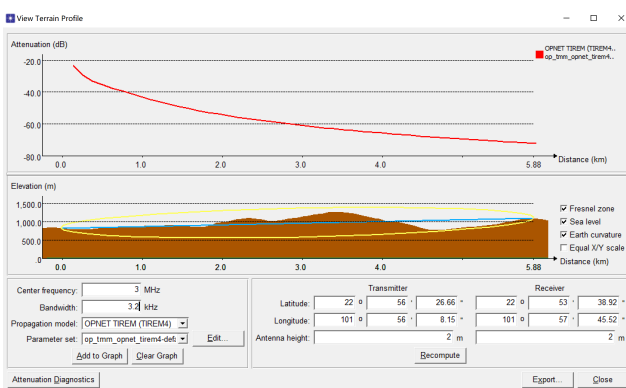


图 25 干扰机到节点 3 的地形起伏  
Fig.25 Topographic relief from jammer to node 3

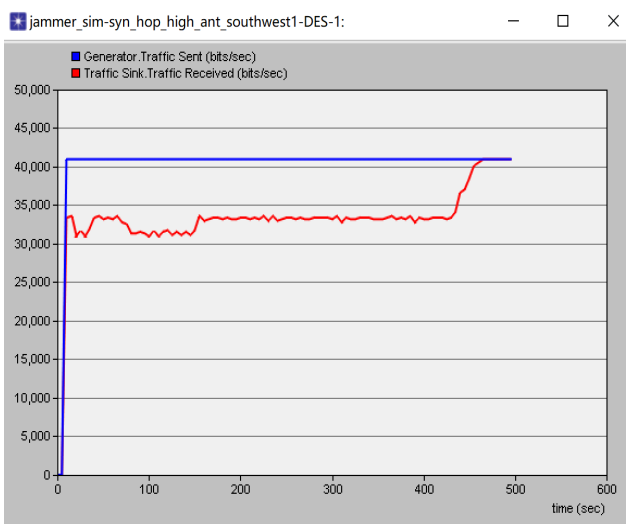


图 26 全网业务收发吞吐量  
Fig.26 Transmit and receive throughput of network-wide services

于该地形下节点 0 和 1 几乎未受明显干扰，因此整体的接收吞吐量也大于上一地形情况。

由图 26—33 的结果可见，干扰机在下降过程中由于山区地形的遮挡，使得干扰机对超短波电台的干扰信号阻挡较多，干扰效果不明显，而对短波电台的阻挡较少，被干扰的程度较大，使得短波电台出现了

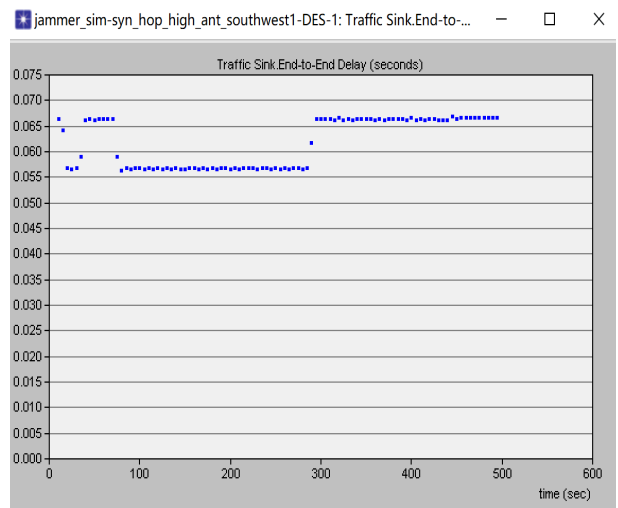


图 27 全网业务端到端时延  
Fig.27 End-to-end delay of network-wide services

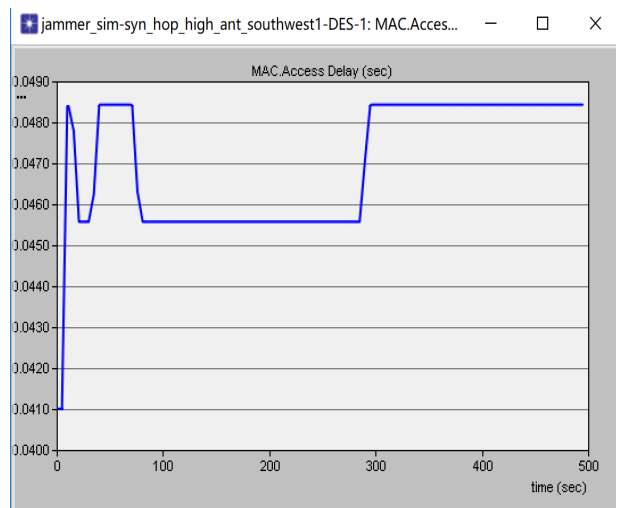


图 28 全网无线信道接入时延  
Fig.28 Wireless channel access delay over the whole network

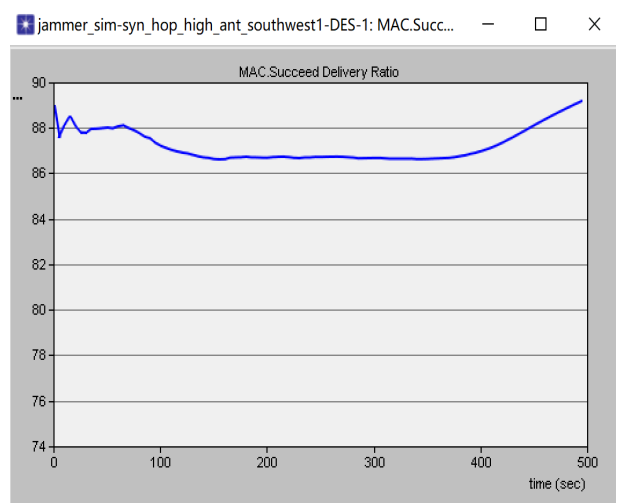


图 29 全网 ToD 同步头报文的投递率  
Fig.29 Delivery rate of ToD synchronized header message in the whole network



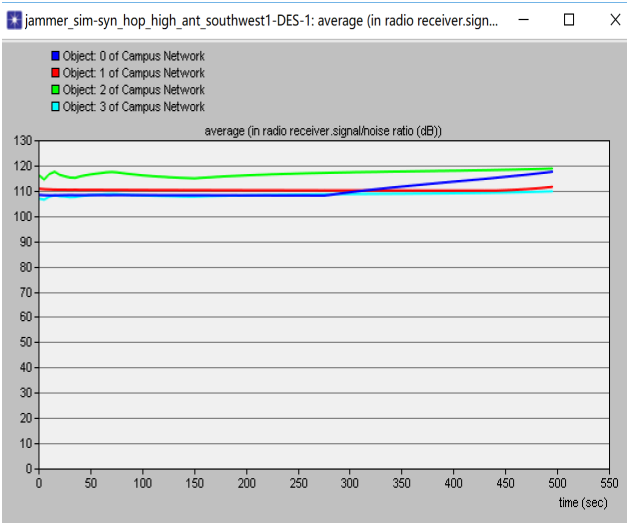


图 30 信噪比  
Fig.30 Signal-to-noise ratio

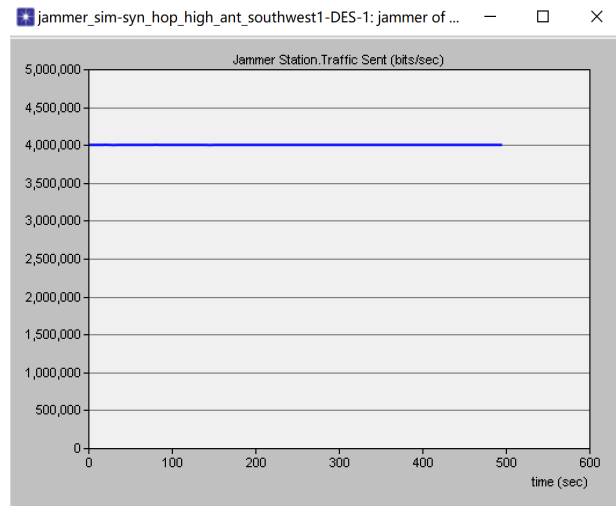


图 33 干扰机的发送吞吐量  
Fig.33 Transmit throughput of jammer

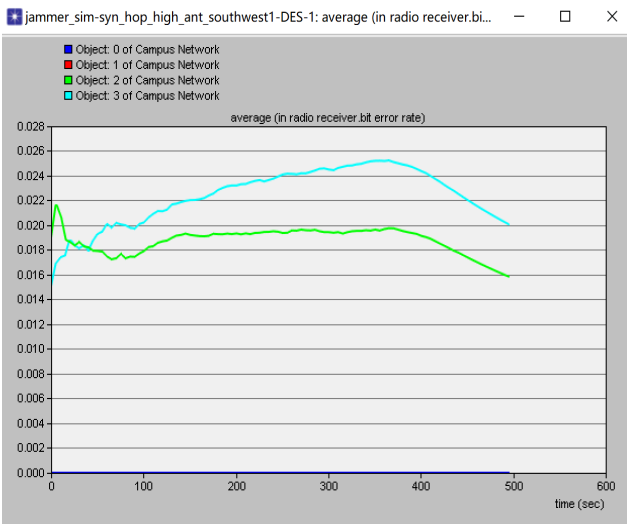


图 31 误码率  
Fig.31 Bit error rate

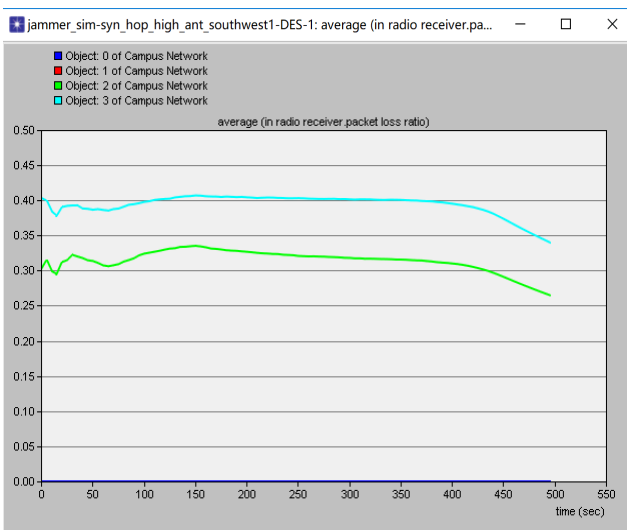


图 32 丢包率  
Fig.32 Packet loss rate

丢包,这部分时间段内全网的业务吞吐量损失主要由短波电台的丢包所致。随着干扰机的进一步下降,对短波电台的干扰信号也被阻挡,使得干扰程度降低,其丢包率和误码率均逐步降低。

### 4 结论

弹载通信干扰机在实际作战使用过程中必须考虑作战环境的影响。

1) 当被干扰电台采用天线低架模式时,不管是什么样的作战环境,都会导致信号传播损耗大于自由空间下的信号传播损耗,对于被干扰电台来说,即自由空间下的有效干扰功率大于非自由空间下的有效干扰功率;

2) 当被干扰电台采用天线高架时,虽然不需要考虑具体的地表参数,但是涉及到具体的作战环境时,必须考虑弹载通信干扰机下降过程中有无受到地形遮挡的影响。通过上述两种场景的模拟和仿真结果可以知道弹载通信干扰机在下降到多少高度时会受到地形遮挡的影响以及不同波段的干扰效果,这将对指挥员在某一作战环境中合理使用弹载通信干扰机,最大限度地提高干扰机的作战效能提供有力的决策支持。

### 参考文献:

[1] 钱立志. 悬浮通信干扰弹[R]. 合肥: 炮兵学院, 2004: 1-13.  
QIAN Li-zhi. Suspended Communication Jamming Projectile[R]. Hefei: Artillery College, 2004: 1-13.

[2] 赵剑锋, 王国成, 张虎. 信息化战场上的致盲利器——通信干扰弹[J]. 国防, 2006(12): 69-70.  
ZHAO Jian-feng, WANG Guo-cheng, ZHANG Hu. Blinding Weapon in Information Battlefield-communication

- ation Jamming Projectile[J]. National Defense, 2006(12): 69-70.
- [3] 孙明亮, 黄戈. 通信干扰弹——用于通信干扰的特种炮弹[J]. 现代军事, 2003(1): 39-40.  
SUN Ming-liang, HUANG Ge. Communication Jamming Projectile-special Artillery Projectile for Communication Jamming[J]. Modern Military, 2003(1): 39-40.
- [4] 那丹彤, 赵维康. 跳频通信干扰与抗干扰技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 39.  
NA Dan-tong, ZHAO Wei-kang. Frequency Hopping Communication Jamming and Anti-jamming Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 39.
- [5] 高原. 美军通信装备抗干扰技术能力发展趋势 [EB/OL]. [2016-11-15]. [http://www.360doc.com/content/16/11/15/10/30774303\\_606681164.shtml](http://www.360doc.com/content/16/11/15/10/30774303_606681164.shtml).  
GAO Yuan. Development trend of anti-jamming technology ability of US army communication equipment [EB/OL]. [2016-11-15]. [http://www.360doc.com/content/16/11/15/10/30774303\\_606681164.shtml](http://www.360doc.com/content/16/11/15/10/30774303_606681164.shtml).
- [6] OPNET 第一章 [EB/OL]. [2014-12-11]. <https://www.docin.com/p-9866259-14.html>.  
Chapter 1 of OPNET[EB/OL]. [2014-12-11]. <https://www.docin.com/p-9866259-14.html>.
- [7] 李默, 赵亮. 基于 OPNET 的无线网络仿真综合实验设计[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(3): 120-123.  
LI Mo, ZHAO Liang. Comprehensive Experimental Design of Wireless Network Simulation Based on OPNET[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(3): 120-123.
- [8] 短波通信概述 [EB/OL]. [2017-02-17]. <https://wenku.baidu.com/view/f8d20b1beffdc8d376eeaeaad1f34693dbef1074.html>.  
Overview of HF Communication[EB/OL]. [2017-02-17]. <https://wenku.baidu.com/view/f8d20b1beffdc8d376eeaeaad1f34693dbef1074.html>.
- [9] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2012: 353.  
YAO Fu-qiang. Communication Anti-jamming Engineering and Practice[M]. 2nd Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 353.
- [10] 那丹彤, 赵维康. 跳频通信干扰与抗干扰技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 13.  
NA Dan-tong, ZHAO Wei-kang. Frequency Hopping Communication Jamming and Anti-jamming Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 13.
- [11] 杨林茂. 复杂电磁环境下跳频电台仿真与通信效能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 33-38.  
YANG Lin-mao. Simulation and Communication Efficiency of Frequency Hopping Radio in Complex Electromagnetic Environment[D]. Changsha: Central South University, 2012: 33-38.
- [12] 那丹彤, 赵维康. 跳频通信干扰与抗干扰技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 9.  
NA Dan-tong, ZHAO Wei-kang. Frequency Hopping Communication Jamming and Anti-jamming Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 9.
- [13] RICHARD A. 现代通信干扰原理与技术[M]. 通信对抗技术国防科技重点实验室译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 10.  
RICHARD A. Principles and Technology of Modern Communication Jamming[M]. Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Communication Countermeasure Technology, Translated. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 10.
- [14] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践 [M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2012: 239-254.  
YAO Fu-qiang. Communication Anti-Jamming Engineering and Practice[M]. 2nd Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 239-254.
- [15] 张杰, 陈栋. 悬浮式弹载通信干扰机干扰性能仿真的边界条件设置问题研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2020,42(1): 118-123.  
ZHANG Jie, CHEN Dong. Study on the Setting of Boundary Conditions for the Simulation of Jamming Performance of Suspension Type Projectile-carried Communication Jammer[J]. Command Control and Simulation, 2020,42(1): 118-123.
- [16] STAVROULAKIS P. Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems[M]. Boston: Artech House, 2003: 51-55
- [17] 王铭三. 通信对抗原理[M]. 北京: 解放军出版社, 1999: 442-452.  
WANG Ming-san. Principle of Communication Countermeasure[M]. Beijing: PLA Press, 1999: 442-452.
- [18] 简波. 跳频系统中的调制方式及同步方案改进研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 20-21.  
JIAN Bo. Improvement of Modulation and Synchronization Scheme in Frequency Hopping System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 20-21.
- [19] 姜恩光. 跳频通信系统设计与同步捕获研究与仿真[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013: 11-12.  
JIANG En-guang. Design of Frequency Hopping Communication System and Synchronous Acquisition Research and Simulation[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2013: 11-12.
- [20] 梅文华. 跳频序列设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 17-18.  
MEI Wen-hua. Frequency Hopping Sequence Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 17-18.