



电磁频谱伞罩

唐友喜¹, 许林², 吴飞¹, 赵宏志^{1*}, 郭文博¹, 邵士海^{1*}

1. 电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室, 成都 611731

2. 中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036

* 通信作者. E-mail: lyn@uestc.edu.cn, ssh@uestc.edu.cn

收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2018-07-13; 接受日期: 2018-11-13; 网络出版日期: 2019-07-16

国家自然科学基金 (批准号: 61531009, 61471108, 61771107)、国家科技重大专项 (批准号: 2016ZX03001009) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

摘要 提出了一种电磁频谱伞罩的方法, 在电磁频谱伞罩覆盖的三维空间内, 非授权用户不可以正常接收其期望的电磁波信号, 授权用户不受此限制. 给出电磁频谱伞罩的构建方法, 分析干扰设备的优化三维布置位置、非授权用户接收机灵敏度的损失量, 给出授权用户接收机的结构及其灵敏度损失界, 最后给出部分实验结果.

关键词 电子战, 授权用户, 非授权用户, 干扰能效, 接收机灵敏度损失

1 引言

随着电磁波的使用越来越深入、广泛, 目前, 三维地理空间中电磁波的使用权已变成现代战争取胜的先决条件^[1~3]. 为了限制敌方的电磁波使用能力, 电子战 100 余年的发展历史可概括为以下 3 个阶段^[4~9]:

(1) 第 1 代电子战, 电子战萌芽阶段. 对应 19 世纪末到第二次世界大战前的时期. 使用电报接收机实时分析敌方或竞争对手电报发射机的工作频点, 调整己方电报发射机工作在相同的频点, 以最大功率发射, 干扰敌方或竞争对手的电报传送功能.

(2) 第 2 代电子战, 专门的无源、有源干扰设备电子战阶段. 对应第二次世界大战到 20 世纪 70 年代前的时期. 无源干扰设备释放金属箔条, 干扰敌方歼击机引导雷达、地对空探测雷达以及高炮目标指示雷达的作战能力. 有源干扰方面, 电子战侦察接收机检测敌方装备所使用的电磁波频率, 同时获取其方位和距离, 调整我方干扰设备对敌方装备进行干扰.

(3) 第 3 代电子战, 自适应电子战阶段. 对应 20 世纪 70 年代以后. 预先侦收、获取、分析某个国家或组织所装备电磁波发射或接收设备的工作频率、强度等信号特征, 制定优化的干扰预案; 实战时依据侦收获取的目标装备工作频率、方位、距离等信号特征, 计算出优化的干扰策略, 达到预期的干扰效果.

引用格式: 唐友喜, 许林, 吴飞, 等. 电磁频谱伞罩. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 911-931, doi: 10.1360/N112018-00112

Tang Y X, Xu L, Wu F, et al. Electromagnetic spectrum umbrella (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 911-931, doi: 10.1360/N112018-00112

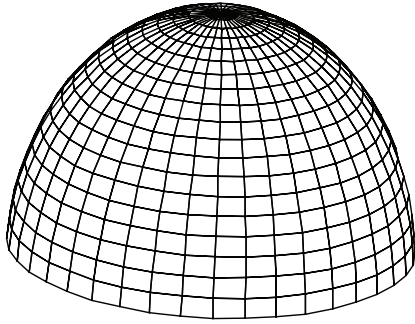


图 1 三维空间中电磁频谱伞罩的电磁波等强度曲面
Figure 1 Equal intensity electromagnetic wave surface of electromagnetic spectrum umbrella in three-dimensional space

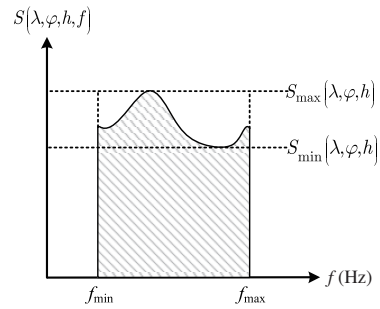


图 2 电磁频谱伞罩内某一位置的电磁波频谱分布
Figure 2 Spectrum distribution of electromagnetic wave at a certain position in an electromagnetic spectrum umbrella

随着技术的发展, 电子战的能力将趋于收敛: 在一个三维地理空间中, 电磁波频谱资源, 我方能用, 敌方不能用^[10].

本文试图给出一种方法, 采用电磁频谱伞罩的技术, 逼近电子战收敛后所具备的能力.

本文其余部分安排如下: 第 2 节给出电磁频谱伞罩的外在形状、构成; 第 3 节讨论电磁频谱伞罩主要涉及的关键技术; 第 4 节分析电磁频谱伞罩的主要性能; 第 5 节给出初步的仿真和实验结果; 最后是本文的总结.

2 电磁频谱伞罩系统模型

在电子战发生的地理区域中, 通过分布于不同位置上的电磁波干扰设备, 在期望的经度、纬度、海拔高度范围内, 形成图 1 所示的电磁波干扰强度区域. 本文中把这个区域称为电磁频谱伞罩.

在电磁频谱伞罩内, 任一位置对应的经度 λ 、纬度 φ 和高度 h 上, 电磁波频谱密度 $S(\lambda, \varphi, h, f)$ 如图 2 所示. 在 $\mathcal{F} = [f_{\min}, f_{\max}]$ 范围内, 电磁波频谱密度最大值为 $S_{\max}(\lambda, \varphi, h)$, 最小值为 $S_{\min}(\lambda, \varphi, h)$.

接下来, 首先, 给出电磁频谱伞罩的组建实例, 说明电磁频谱伞罩的关键是对电磁波的使用进行授权; 其次, 通过电磁频谱伞罩的组建实例, 引出电磁频谱伞罩系统模型, 阐明电磁频谱伞罩节点模型.

2.1 电磁频谱伞罩的组建

图 3 给出了电磁频谱伞罩的三维结构, 由一个圆柱体和一个球的切面体组成. 其中, 圆柱体的直径为 R 、高度为 H , 切面体的切面圆直径为 R , 高度为 D . 电磁频谱伞罩内的电磁波设备包含有:

(1) 我方电磁波设备, 包括通信设备 C、导航设备 N、敌我识别设备 I、电子战侦察设备 W、雷达设备 R 和干扰设备 J.

(2) 敌方电磁波设备 E, 包含有通信、导航、敌我识别、电子战侦察以及雷达等功能的设备.

图 3 中的我方设备, 配备有电磁频谱伞罩钥匙. 电磁频谱伞罩通过分发电磁频谱伞罩钥匙, 对伞罩内电磁波的使用进行授权:

(1) 电磁频谱伞罩钥匙存储有我方干扰设备的干扰信号特征.

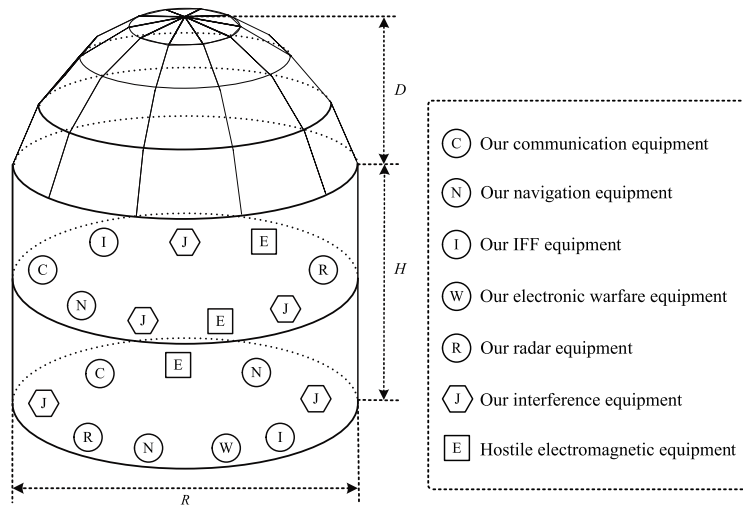


图 3 电磁频谱伞罩的三维结构

Figure 3 Three-dimensional structure of electromagnetic spectrum umbrella

(2) 授权用户拥有电磁频谱伞罩钥匙, 可以正常接收其期望的电磁波信号, 如图 3 中的我方电磁波设备, 在该电磁频谱伞罩内可以正常工作.

(3) 非授权用户没有电磁频谱伞罩钥匙, 不可以正常接收其期望的电磁波信号, 如图 3 中的敌方电磁波设备, 在该电磁频谱伞罩内不可以正常工作.

图 4 给出了电磁频谱伞罩的一个应用案例, 其中:

(1) 我方电磁波设备包括通信设备 C1、导航设备 N1、敌我识别设备 I1、电子战设备 W1 和 W2、雷达设备 R1、机载干扰设备 J1 和 J2 以及车载干扰设备 J3 和 J4. 指挥控制中心管理我方电磁波设备. 我方电磁波设备安装有电磁频谱伞罩钥匙, 可以正常工作. 通信设备 C1 能够正常进行无线通信, 导航设备 N1 能够正常导航, 敌我识别设备 I1 能够正常识别敌我, 电子战侦察设备 W1 和 W2 能够正常进行目标探测、定位等功能, 雷达设备 R1 能够正常进行目标跟踪、测距等功能, 指挥控制中心能够正常管理我方电磁波设备.

(2) 敌方电磁波设备包括 E1, E2 和 E3. 敌方电磁波设备, 未配备有电磁频谱伞罩钥匙, 不可以正常接收其期望的电磁波信号. E1, E2 和 E3 之间的无线通信受到干扰, 三架飞机之间不能实时进行信息沟通.

2.2 电磁频谱伞罩系统模型

接下来给出电磁频谱伞罩系统模型和节点模型.

我方电磁波设备需要满足电磁频谱伞罩节点模型标准, 因此, 任何一个我方电磁波设备, 可以根据实战需要, 配置成通信设备、导航设备、敌我识别设备、电子战侦察设备、雷达设备和干扰设备等. 特别的, 为了便于管理电磁频谱伞罩节点, 电磁频谱伞罩内, 会存在管理其他电磁频谱伞罩节点的中心节点, 称之为电磁频谱伞罩控制中心节点.

图 5 给出了电磁频谱伞罩的系统模型, 由电磁频谱伞罩节点和控制中心节点组成:

(1) 电磁频谱伞罩控制中心节点, 管理电磁频谱伞罩节点, 配置电磁频谱伞罩资源.

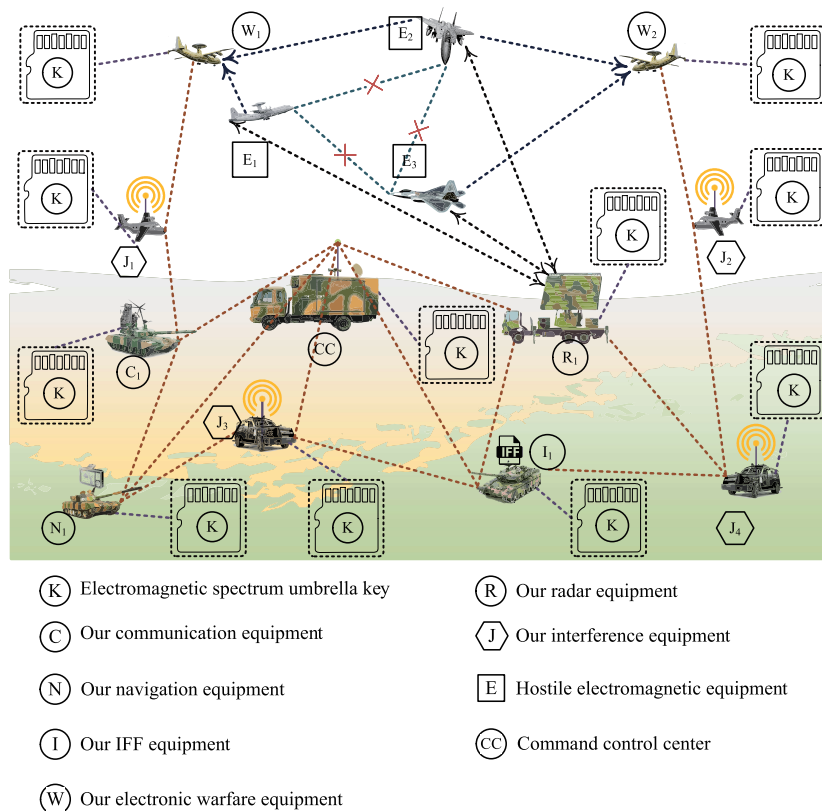


图 4 (网络版彩图) 电磁频谱伞罩的一个应用案例

Figure 4 (Color online) An application case of electromagnetic spectrum umbrella

(2) 电磁频谱伞罩节点可以形成节点簇, 每个节点簇包括多个电磁频谱伞罩节点, 如节点簇 i 和 j 分别包含电磁频谱伞罩节点 $i_1, \dots, i_n, \dots, i_N$ 和 $j_1, \dots, j_m, \dots, j_M$.

(3) 电磁频谱伞罩节点之间的互联互通, 可用无线、光纤、铜缆和双绞线等的一种或多种形式.

(4) 如果某个电磁频谱伞罩节点或节点簇与其他节点或节点簇使用无线互联, 该节点或节点簇须配备一个电磁频谱伞罩钥匙; 如果使用有线互联, 相互连接的多个节点或节点簇可以共用一个电磁频谱伞罩钥匙.

(5) 当电磁频谱伞罩控制中心节点毁坏后, 其他某一个电磁频谱伞罩节点可以升级为电磁频谱伞罩控制中心节点.

图 6 给出了电磁频谱伞罩的一个节点模型:

(1) 电磁频谱伞罩节点使用智能硬件, 采用相同的硬件架构, 通过配置接收机和发射机参数, 具备电磁频谱伞罩节点的特定功能.

(2) 电磁频谱伞罩节点根据特定的任务要求, 产生相应的信号波形, 常见的波形包括雷达、通信、导航、侦察、识别和干扰波形.

(3) 人工智能 (artificial intelligence, AI) 是电磁频谱伞罩节点的大脑, 综合侦收到的敌方电磁波所承载的信息, 优化电磁频谱伞罩节点的信号波形和电磁频谱伞罩节点的部署位置, 最大化电磁频谱伞罩的能力.

(4) 操作维护是电磁频谱伞罩的管家, 完成人机交互、电磁频谱伞罩管理、运行维护等功能.

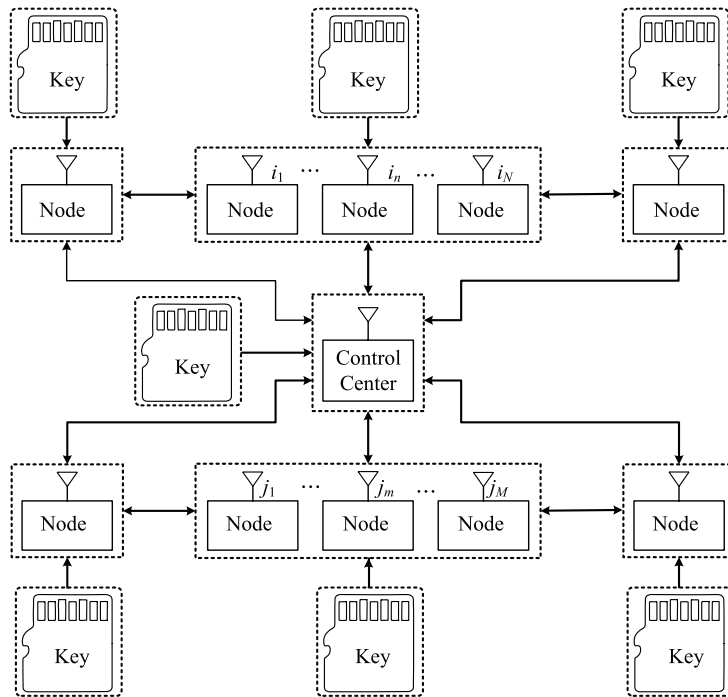


图 5 电磁频谱伞罩的系统模型

Figure 5 System model of electromagnetic spectrum umbrella

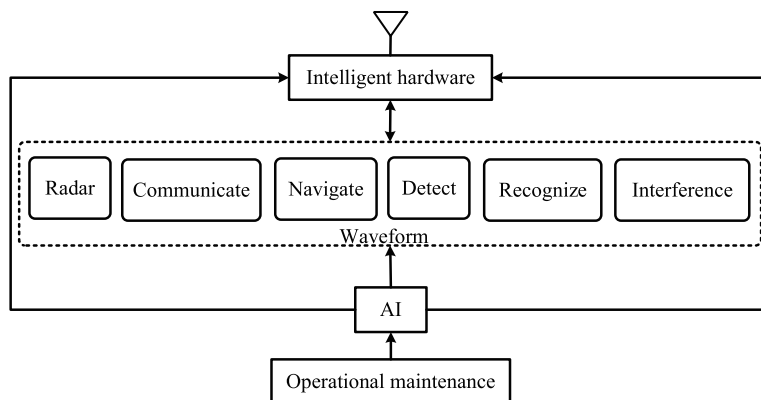


图 6 电磁频谱伞罩的节点模型

Figure 6 Node model of electromagnetic spectrum umbrella

综上所述, 当对我方现有电磁波设备进行升级时, 可考虑如下策略: 近期可以直接对现有电磁波设备添加电磁频谱伞罩钥匙和升级硬件, 以完成电磁波使用的授权功能; 将来要求我方电磁波设备的生产满足电磁频谱伞罩节点模型标准。

3 电磁频谱伞罩关键技术

电磁频谱伞罩主要涉及电磁频谱伞罩节点自干扰抑制, 辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点互连方

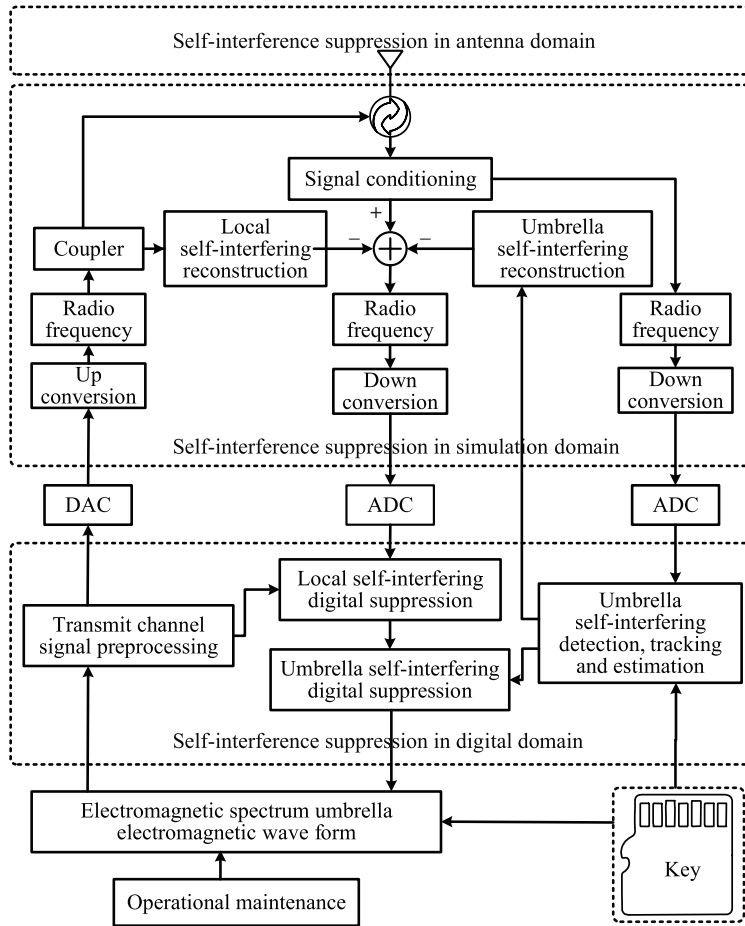


图 7 一种电磁频谱伞罩节点的信号处理流程

Figure 7 A signal processing flow of electromagnetic spectrum umbrella node

法和辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点优化部署等关键技术。

3.1 电磁频谱伞罩节点自干扰抑制

在电磁频谱伞罩内, 电磁频谱伞罩节点在发射信号时, 同时进行期望信号的接收. 这样, 电磁频谱伞罩节点会接收到自己发射的信号以及具有干扰功能的电磁频谱伞罩节点发射的干扰信号, 分别称为本机自干扰和伞罩自干扰. 这两种自干扰都会影响期望信号的接收.

具体来讲, 本机自干扰是本地设备发射信号, 经过本机自干扰信道反射, 对本地设备接收通道产生的同时同频干扰. 伞罩自干扰是由我方电磁波设备的发射信号, 经过伞罩自干扰信道, 在相同的频率点上对接收通道产生的干扰. 本机自干扰一般远强于伞罩自干扰.

图 7 给出了一种电磁频谱伞罩节点信号处理流程.

从自干扰信号的抑制处理流程角度, 本机自干扰和伞罩自干扰包括 3 种自干扰抑制方法^[11]:

- (1) 天线域自干扰抑制. 通过天线的空域特征, 降低进入接收机通道的自干扰功率.
- (2) 模拟域自干扰抑制. 防止接收通道饱和, 通过模拟自干扰抑制技术进一步降低自干扰功率.
- (3) 数字域自干扰抑制. 将接收到的剩余自干扰尽量抑制掉.

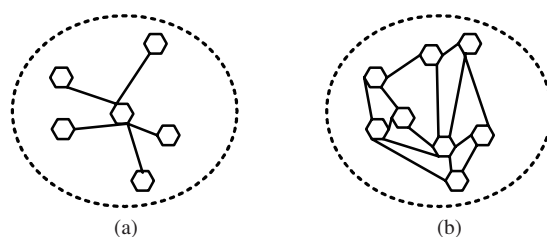


图 8 辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点的无线互连架构

Figure 8 Wireless interconnect architecture of electromagnetic spectrum umbrella node for radiated interference waveform. (a) Centralized architecture; (b) self-organizing structure

特别地, 数字域自干扰抑制, 包括线性和非线性数字域自干扰抑制:

(1) 线性数字域自干扰抑制. 线性数字域自干扰抑制, 以电磁频谱伞罩钥匙中的线性信息为先验知识, 对我方干扰信号进行检测、跟踪和预估. 通过实时获得的线性干扰的幅度、时间、频率、功率等参数, 抑制一个或者多个线性自干扰.

(2) 非线性数字域自干扰抑制. 非线性数字域自干扰抑制, 以电磁频谱伞罩钥匙的非线性信息为先验知识, 对我方干扰信号进行检测、跟踪和预估. 通过实时获得的非线性干扰的幅度、时间、频率、功率等参数, 抑制一个或者多个非线性自干扰.

从自干扰信号的产生来源分析, 自干扰抑制包括:

(1) 本机自干扰抑制. 本地接收机知道本机自干扰发射信号, 不需要使用电磁频谱伞罩钥匙的先验信息. 本机自干扰抑制, 首先在天线域降低本机自干扰功率, 然后在模拟域通过本机自干扰重建来抑制本机自干扰.

(2) 伞罩自干扰抑制. 本地接收机不知道伞罩自干扰信息, 需要使用电磁频谱伞罩钥匙的先验信息. 伞罩本机自干扰抑制, 首先在天线域降低伞罩自干扰功率, 然后对伞罩自干扰进行检测、跟踪和预估, 在模拟域和数字域对伞罩自干扰进行抑制.

3.2 辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点无线互连方法

辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点的互连互通, 是实现电磁频谱伞罩的基础, 主要有两种架构, 如图 8 所示.

(1) 集中式架构. 每个节点只与主控节点进行信息交互.

(2) 自组织架构. 电磁频谱伞罩内没有固定的主控节点, 每个节点同时承担终端、路由等功能, 构成自适应网络, 如 Ad-hoc 网.

辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点的互连需要解决下述矛盾:

(1) 若发射功率过弱, 不能有效切断敌方设备的电磁波使用权.

(2) 若发射功率过强, 会提高我方电磁波设备对干扰信号的抑制难度, 降低我方电磁波设备的接收机灵敏度.

3.3 辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点优化部署

辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点, 如果过于集中, 不能有效地干扰敌方电磁波设备; 过于分散, 则会增加节点的互连互通难度^[12]. 本节给出辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点优化部署.

设第 n 个辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点的坐标为 $\mathbf{m}_n = (\lambda_n, \varphi_n, h_n)$. 不失一般性, 设任一敌方电磁波设备的坐标为 $\mathbf{m} = (\lambda, \varphi, h)$.

敌方电磁波设备接收到的第 n 个辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点的干扰信号 $y_n(t)$ 为

$$y_n(t) = h_{(\phi^R, \vartheta^R)(\phi_n^T, \vartheta_n^T)}^{\mathbf{m}_n, \mathbf{m}}(t) \otimes j_n(t), \quad (1)$$

其中 \otimes 表示卷积操作; $h_{(\phi^R, \vartheta^R)(\phi_n^T, \vartheta_n^T)}^{\mathbf{m}_n, \mathbf{m}}(t)$ 表示第 n 个辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点到敌方电磁波设备的信道冲击响应, 受发射天线幅度增益、无线信道冲击响应和接收天线幅度增益等因数的影响, 其中 (ϕ^R, ϑ^R) 表示敌方电磁波设备接收天线指向, $(\phi_n^T, \vartheta_n^T)$ 表示第 n 个辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点发送天线指向, 当天线指向确定时, $h_{(\phi^R, \vartheta^R)(\phi_n^T, \vartheta_n^T)}^{\mathbf{m}_n, \mathbf{m}}(t)$ 可以采用射线跟踪等方法进行三维模拟计算^[13]; $j_n(t) = A_n b_n(t) \cos(\omega_n t + \theta_n)$ 表示第 n 个辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点的干扰信号, 其中 A_n , $b_n(t)$, ω_n 和 θ_n 表示干扰信号的幅度、基带信号、载波频率和相位, θ_n 服从 $[0, 2\pi)$ 的均匀分布, $b_n(t)$ 与 θ_n 相互独立.

敌方电磁波设备接收到的信号, 为 N 个干扰信号 $y_n(t)$, $n = 1, \dots, N$ 的叠加:

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{n=1}^N y_n(t) + n(t) \\ &= \sum_{n=1}^N h_{(\phi^R, \vartheta^R)(\phi_n^T, \vartheta_n^T)}^{\mathbf{m}_n, \mathbf{m}}(t) \otimes j_n(t) + n(t), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $n(t)$ 表示加性 Gauss 白噪声, 功率谱密度为 N_0 .

敌方电磁波设备接收到的干扰信号 $y(t)$ 的平均功率谱密度 $S_{yy}(\mathbf{m}, f)$ 为^[14]

$$S_{yy}(\mathbf{m}, f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{yy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (3)$$

其中, 当敌方电磁波设备接收到的干扰信号 $y_n(t)$ 为广义平稳且干扰信号之间是广义互平时, $y(t)$ 为广义平稳, 自协方差 $C_{yy}(\tau)$ 为^[14]

$$C_{yy}(\tau) = E[(y(t) - E[y(t)])(y(t - \tau) - E[y(t)])^*], \quad (4)$$

其中 $E[\cdot]$ 表示期望操作.

设 $C_{y_k y_l}(\tau) = E[(y_k(t) - E[y_k(t)])(y_l(t - \tau) - E[y_l(t)])^*]$, 热噪声 $n(t)$ 与敌方电磁波设备接收到的干扰信号 $y(t)$ 相互独立, 信道冲击响应 $h_{(\phi^R, \vartheta^R)(\phi_n^T, \vartheta_n^T)}^{\mathbf{m}_n, \mathbf{m}}(t)$ 与干扰信号 $j_n(t)$ 相互独立, 功率谱密度 $S_{yy}(\mathbf{m}, f)$ 为

$$\begin{aligned} S_{yy}(\mathbf{m}, f) &= \sum_k^N \sum_l^N \int_{-\infty}^{\infty} C_{y_k y_l}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau + N_0 \\ &= \sum_k^N \sum_l^N S_{h_k h_l}(f) S_{j_k j_l}(f) + N_0, \end{aligned} \quad (5)$$

其中信道冲击响应 $h_{(\phi^R, \vartheta^R)(\phi_n^T, \vartheta_n^T)}^{\mathbf{m}_n, \mathbf{m}}(t)$ 的互功率谱 $S_{h_k h_l}(f)$ 和干扰信号 $j_n(t)$ 的互功率谱 $S_{j_k j_l}(f)$ 为

$$\begin{aligned} S_{h_k h_l}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} C_{h_k h_l}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \\ S_{j_k j_l}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} C_{j_k j_l}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \end{aligned} \quad (6)$$

其中互协方差 $C_{h_k h_l}(\tau)$ 和 $C_{j_k j_l}(\tau)$ 分别为

$$\begin{aligned} C_{h_k h_l}(\tau) &= \mathbb{E} \left[\left(h_{(\phi_k^R, \vartheta_k^R)(\phi_k^T, \vartheta_k^T)}^{\mathbf{m}_k, \mathbf{m}}(t) - \mathbb{E} \left[h_{(\phi_k^R, \vartheta_k^R)(\phi_k^T, \vartheta_k^T)}^{\mathbf{m}_k, \mathbf{m}}(t) \right] \right) \right. \\ &\quad \cdot \left. \left(h_{(\phi_l^R, \vartheta_l^R)(\phi_l^T, \vartheta_l^T)}^{\mathbf{m}_l, \mathbf{m}}(t - \tau) - \mathbb{E} \left[h_{(\phi_l^R, \vartheta_l^R)(\phi_l^T, \vartheta_l^T)}^{\mathbf{m}_l, \mathbf{m}}(t) \right] \right)^* \right], \\ C_{j_k j_l}(\tau) &= \mathbb{E} [(j_k(t) - \mathbb{E}[j_k(t)])(j_l(t - \tau) - \mathbb{E}[j_l(t)])^*] \\ &= \mathbb{E}[j_k(t)j_l^*(t - \tau)] - \mathbb{E}[j_k(t)]\mathbb{E}[j_l^*(t)] \\ &= A_k A_l \mathbb{E}[b_k(t)b_l^*(t - \tau) \cos(\omega_k t + \theta_k) \cos(\omega_l(t - \tau) + \theta_l)], \end{aligned} \quad (7)$$

其中干扰信号 $j_n(t)$ 的均值为 $\mathbb{E}[j_n(t)] = \mathbb{E}[A_n b_n(t) \cos(\omega_n t + \theta_n)] = 0$.

辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点, 部署目标是在节点数量和总干扰发射功率有限的情况下, 优化节点数量 N 和对应的三维坐标 $\mathbf{m}_n, n = 1, \dots, N$, 天线指向 $(\phi_n^T, \vartheta_n^T), n = 1, \dots, N$ 和发射功率 $P_n, n = 1, \dots, N$, 以使电磁频谱伞罩内的敌方电磁波设备, 在任意地点、任意频点、任意接收天线指向下, 接收到的干扰信号功率谱密度 $S_{yy}(\mathbf{m}, f)$ 达到最大^[15, 16]:

$$\begin{aligned} &\arg \max_{\substack{N \in \mathbb{N}^+, \{m_n \in \mathcal{D}\}_{n=1}^N, \\ \{\phi_n^T \in [0, 2\pi)\}_{n=1}^N, \{\vartheta_n^T \in [0, 2\pi)\}_{n=1}^N}} \left\{ \min_{\substack{m \in \mathcal{D}, f \in \mathcal{F}, \\ \phi^R \in [0, 2\pi), \vartheta^R \in [0, 2\pi)}} S_{yy}(\mathbf{m}, f) \right\} \\ &\text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^N P_n \leq P_{\max}, \\ &\quad P_n^{\min} \leq P_n \leq P_n^{\max}, n = 1, \dots, N, \\ &\quad N \leq N_{\max}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 \mathcal{D} 表示电磁频谱伞罩区域; $P_n = \mathbb{E}[j_n(t)j_n^*(t)]$ 表示第 n 个辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点发射功率. 优化后节点数量、三维位置坐标、天线指向和发射功率分别为 $N_{\text{opt}}, \mathbf{m}_n^{\text{opt}}, n = 1, \dots, N_{\text{opt}}, ((\phi_n^T)^{\text{opt}}, (\vartheta_n^T)^{\text{opt}}), n = 1, \dots, N_{\text{opt}}$ 和 $P_n^{\text{opt}}, n = 1, \dots, N_{\text{opt}}$. 该优化问题是一个 max-min 问题, 其可行域非凸集, 所以是一个非凸优化问题.

式 (8) 是以电磁频谱伞罩一个干扰工作周期 T 的统计功率谱密度 $S_{yy}(\mathbf{m}, f)$ 为优化目标. 当完成辐射干扰波形的电磁频谱伞罩节点部署后, 敌方接收到的干扰信号瞬时功率谱随着干扰信道的变化而变化, 设为 $S_{yy}(\mathbf{m}, f, t)$ ^[17].

4 电磁频谱伞罩关键技术

本节介绍电磁频谱伞罩干扰的主要技术指标, 包括非授权用户接收机灵敏度损失、授权用户接收机灵敏度损失和电磁频谱伞罩干扰效能.

4.1 电磁频谱伞罩非授权用户接收机灵敏度损失

坐标为 \mathbf{m} 的非授权用户接收到的信号 $r_S(t)$ 为

$$r_S(t) = d_S(t) + y_S(t) + n_S(t), \quad (9)$$

其中 $d_S(t)$ 表示期望信号; $y_S(t)$ 表示干扰信号; $n_S(t)$ 表示加性 Gauss 白噪声.

假设 $d_S(t)$, $y_S(t)$ 与 $n_S(t)$ 相互独立, 则接收信号 $r_S(t)$ 的自相关为

$$E[r_S(t)r_S^*(t)] = E[d_S(t)d_S^*(t)] + E[y_S(t)y_S^*(t)] + E[n_S(t)n_S^*(t)]. \quad (10)$$

设非授权用户的工作频率与带宽分别为 f 和 B ; 非授权接收机的输入端的有用信号功率 $P_S^d(t) = E[d_S(t)d_S^*(t)]$; 干扰信号的功率为 $P_S^y(t) = \int_{f-\frac{B}{2}}^{f+\frac{B}{2}} S_{yy}(\mathbf{m}, u, t) du$; 噪声的功率为 $P_S^n(t) = kTB$, 其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 表示 Boltzmann 常数, T 表示温度 (K). 非授权用户接收机输入端的信噪比 $\text{SNR}_S^i(\mathbf{m}, f, B, t)$ 为

$$\text{SNR}_S^i(\mathbf{m}, f, B, t) = \frac{P_S^d(t)}{P_S^y(t) + P_S^n(t)}. \quad (11)$$

若接收机噪声系数为 F_S , 接收机输出端的信噪比 $\text{SNR}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 为^[18,19]

$$\text{SNR}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t) = \frac{P_S^d(t)}{P_S^y(t) + F_S P_S^n(t)}. \quad (12)$$

同理, 当无干扰时, 接收机输出端的信噪比 $\widetilde{\text{SNR}}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 为

$$\widetilde{\text{SNR}}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t) = \frac{P_S^d(t)}{F_S P_S^n(t)}. \quad (13)$$

综上所述, 坐标为 \mathbf{m} 的非授权用户接收机在 t 时刻的灵敏度恶化 $R_S^E(\mathbf{m}, f, B, t)$, 等于无干扰与有干扰时接收机输出端的信噪比 $\widetilde{\text{SNR}}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 和 $\text{SNR}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 之比:

$$\begin{aligned} R_S^E(\mathbf{m}, f, B, t) &= \frac{\widetilde{\text{SNR}}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t)}{\text{SNR}_S^o(\mathbf{m}, f, B, t)} \\ &= 1 + \frac{\int_{f-\frac{B}{2}}^{f+\frac{B}{2}} S_{yy}(\mathbf{m}, u, t) du}{kTB F_S}. \end{aligned} \quad (14)$$

讨论:

(1) 非授权接收机灵敏恶化程度 $R_S^E(\mathbf{m}, f, B, t)$ 随电磁频谱伞罩内干扰频谱密度 $S_{yy}(\mathbf{m}, f, t)$ 和接收机带宽 B 的增加而增加.

(2) 受非授权用户接收机噪声系数 F_S 影响, 非授权用户接收机灵敏恶化程度 $R_S^E(\mathbf{m}, f, B, t)$, 小于电磁频谱伞罩的天线输出端口干扰信号功率与热噪声功率的 dB 差值. 当非授权用户接收机的噪声系数 F_S 越高, 接收机灵敏恶化 $R_S^E(\mathbf{m}, f, B, t)$ 越小.

4.2 电磁频谱伞罩授权用户接收机灵敏度损失

坐标为 \mathbf{m} 的授权用户接收到的信号 $r_A(t)$ 为

$$r_A(t) = d_A(t) + \bar{y}_A(t) + y_A(t) + n_A(t), \quad (15)$$

其中 $d_A(t)$ 表示期望信号; $\bar{y}_A(t)$ 表示本机自干扰信号; $y_A(t)$ 表示伞罩自干扰信号; $n_A(t)$ 表示加性 Gauss 白噪声.

假设 $d_A(t)$, $\bar{y}_A(t)$, $y_A(t)$ 与 $n_A(t)$ 相互独立, 则接收信号 $r_A(t)$ 的自相关为

$$E[r_A(t)r_A^*(t)] = E[d_A(t)d_A^*(t)] + E[\bar{y}_A(t)\bar{y}_A^*(t)] + E[y_A(t)y_A^*(t)] + E[n_A(t)n_A^*(t)]. \quad (16)$$

设授权用户工作频率与带宽为 f 和 B ; 授权接收机输入端有用信号功率为 $P_A^d(t) = E[d_A(t)d_A^*(t)]$; 自干扰功率为 $P_A^y(t) = E[\bar{y}_A(t)\bar{y}_A^*(t)]$; 伞罩自干扰功率为 $P_A^y(t) = \int_{f-\frac{B}{2}}^{f+\frac{B}{2}} S_{yy}(\mathbf{m}, u, t) du$; 噪声功率为 $P_A^n(t) = kTB$. 使用自干扰抵消的授权用户接收机输入端的信噪比 $\text{SNR}_A^i(\mathbf{m}, f, B, t)$ 为

$$\text{SNR}_A^i(\mathbf{m}, f, B, t) = \frac{P_A^d(t)}{P_A^y(t) + P_A^y(t) + P_A^n(t)}. \quad (17)$$

如图7所示, 对于授权用户接收机, 因加法器引起的衰减为 L_{add} , 噪声系数修正为 $F_A = L_{\text{add}}F_S$. 设 $M_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B)$ 表示对伞罩自干扰信号的抑制量; $\tilde{M}_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B, t)$ 是对本机自干扰的抑制量, 接收机输出端的信噪比 $\text{SNR}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 为^[18, 19]

$$\text{SNR}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t) = \frac{P_A^d(t)}{\frac{P_A^y(t)}{\tilde{M}_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B, t)} + \frac{P_A^y(t)}{M_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B, t)} + F_A P_A^n(t)}. \quad (18)$$

同理, 无干扰时, 未使用自干扰抵消的接收机输出端的信噪比 $\widetilde{\text{SNR}}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 为

$$\widetilde{\text{SNR}}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t) = \frac{P_A^d(t)}{F_S P_A^n(t)}. \quad (19)$$

综上所述, 位置坐标为 \mathbf{m} 的授权用户接收机在时刻 t 的灵敏度恶化 $R_A^E(\mathbf{m}, f, B, t)$, 等于无干扰与有干扰时接收机输出端的信噪比 $\widetilde{\text{SNR}}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 和 $\text{SNR}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t)$ 之比:

$$\begin{aligned} R_A^E(\mathbf{m}, f, B, t) &= \frac{\widetilde{\text{SNR}}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t)}{\text{SNR}_A^o(\mathbf{m}, f, B, t)} \\ &= L_{\text{add}} + \frac{P_A^y(t)}{kTB F_S \tilde{M}_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B, t)} + \frac{\int_{f-\frac{B}{2}}^{f+\frac{B}{2}} S_{yy}(\mathbf{m}, u, t) du}{kTB F_S M_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B, t)}. \end{aligned} \quad (20)$$

讨论:

(1) 授权接收机灵敏度恶化, $R_A^E(\mathbf{m}, f, B, t)$ 随着电磁频谱伞罩内的干扰频谱密度 $S_{yy}(\mathbf{m}, f, t)$ 和接收机带宽 B 的增加而增加.

(2) 授权用户接收机的伞罩自干扰抑制和本机自干扰抑制量决定其接收机灵敏度恶化程度. 特别地, $M_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B, t) \rightarrow \infty$ 且 $\tilde{M}_{\text{SI}}(\mathbf{m}, f, B, t) \rightarrow \infty$, 授权用户接收机的接收机灵敏度不会恶化.

(3) 授权接收机因自干扰抵消引入的插入损耗 L_{add} 越大, 授权用户接收机灵敏度恶化越严重.

4.3 电磁频谱伞罩干扰效能方程

考虑电磁频谱伞罩授权用户的电磁波设备接收机灵敏度恶化、非授权用户的电磁波设备接收机灵敏度恶化和总干扰发射功率, 提出了电磁频谱伞罩的效能评估方程.

定义非授权用户在 T_0 时间内的非正常接收概率 $P_S(f, B, \Omega_S)$ 为, 电磁波设备接收机的灵敏度恶化量不小于门限 Ω_S 的时间与空间乘积和整个电磁频谱伞罩的时间与空间乘积之比:

$$P_S(f, B, \Omega_S) = \frac{\int_0^{T_0} \iiint_{\mathcal{D}} D(R_S^E(\mathbf{m}, f, B, t), \Omega_S) d\lambda d\varphi dh dt}{T_0 \iiint_{\mathcal{D}} d\lambda d\varphi dh}, \quad (21)$$

其中函数 $D(x, y)$ 为

$$D(x, y) = \begin{cases} 1, & x \geq y, \\ 0, & \text{others.} \end{cases}$$

定义授权用户在 T_0 时间内的非正常接收概率 $P_A(f, B, \Omega_A)$ 为, 电磁波设备接收机的灵敏度恶化量不小于门限 Ω_A 的时间与空间乘积和整个电磁频谱伞罩的时间与空间乘积:

$$P_A(f, B, \Omega_A) = \frac{\int_0^{T_0} \iiint_{\mathcal{D}} D(R_A^E(\mathbf{m}, f, B, t), \Omega_S) d\lambda d\varphi dh dt}{T_0 \iiint_{\mathcal{D}} d\lambda d\varphi dh}. \quad (22)$$

给定 B, Ω_S 和 Ω_A , 电磁频谱伞罩的效能 η 为

$$\eta = \frac{\min_{f \in \mathcal{F}} P_S(f, B, \Omega_S) - \max_{f \in \mathcal{F}} P_A(f, B, \Omega_A)}{\sum_{n=1}^{N^{\text{opt}}} P_n} \iiint_{\mathcal{D}} d\lambda d\varphi dh, \quad (23)$$

其中 η 的单位 m^3/W , 优化后的干扰发射功率满足 $\sum_{n=1}^{N^{\text{opt}}} P_n^{\text{min}} \leq \sum_{n=1}^{N^{\text{opt}}} P_n \leq P_{\text{max}}$.

讨论:

(1) 通常情况下 $\min_{f \in \mathcal{F}} P_S(f, B, \Omega_S) \rightarrow 1, \max_{f \in \mathcal{F}} P_A(f, B, \Omega_A) \rightarrow 0$, 即 $\min_{f \in \mathcal{F}} P_S(f, B, \Omega_S) - \max_{f \in \mathcal{F}} P_A(f, B, \Omega_A) > 0$, 因此电磁频谱伞罩的效能 $\eta > 0$.

(2) 对特定的电磁频谱伞罩区域 \mathcal{D} , 当非授权用户的电磁波设备的恶化概率 $P_S(f, B, \Omega_S)$ 越大、授权用户的电磁波设备的恶化概率 $P_A(f, B, \Omega_A)$ 越小、总干扰节点发射功率 $\sum_{n=1}^{N^{\text{opt}}} P_n$ 越小、干扰节点数 N^{opt} 越小时, 电磁频谱伞罩的效能 η 越大.

5 数值与实验结果

本节给出了简化的电磁频谱伞罩数值与实验结果. 应用现有成熟的本机自干扰抑制技术, 考虑数值仿真时, 本机自干扰得到良好的抑制; 实验场景下, 暂时未考虑本机自干扰. 这样, 可以通过数值仿真和实验分析研究电磁频谱伞罩核心指标——伞罩自干扰抑制, 对电磁频谱伞罩性能的影响.

5.1 数值仿真

数值仿真的电磁频谱伞罩形状为圆柱体, 高度为 2 km, 半径为 10 km. 干扰节点均匀放置在电磁频谱伞罩内. 电磁频谱伞罩参数设置如下: 频率覆盖范围 $\mathcal{F} = [1 \ 2]$ GHz; 接收机噪声系数 $F_S = 10$ dB; 射频加法器的衰减系数为 $L_{\text{add}} = 1.5$ dB; 总干扰功率 $P_{\text{tot}} = 10^6$ W; 干扰节点和电磁波设备均为全向天线, 天线增益为 0 dB; 路径衰减使用自由空间传输损耗公式^[20], 即 $L = 32.5 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$, f 和 d 分别表示工作频率和传输距离; 伞罩自干扰抑制制度为 $M_{\text{SI}} = 45$ dB; 本机自干扰抑制制度为 $\tilde{M}_{\text{SI}} = 150$ dB. 授权用户和非授权用户随机分布在电磁频谱伞罩内, 仿真点数为 10^5 .

图 9 给出了授权和非授权用户接收机灵敏度损失概率与干扰节点数的关系. 灵敏度损失概率统计门限设置为 $\Omega_S = 46.8$ dB 和 $\Omega_A = 9.3$ dB. 从总体趋势上看, 当干扰节点数较少时, 授权和非授权用户接收机的灵敏度损失概率, 随着干扰节点的增加而增加; 当干扰节点数较大时, 授权和非授权用户接收机的灵敏度损失概率, 随着干扰节点的增加而减小. 对于非授权用户接收机, 造成上述现象的原因为: 当干扰节点数较少时, 越靠近干扰节点的非授权用户, 接收机灵敏度损失越大, 但只有该干扰节

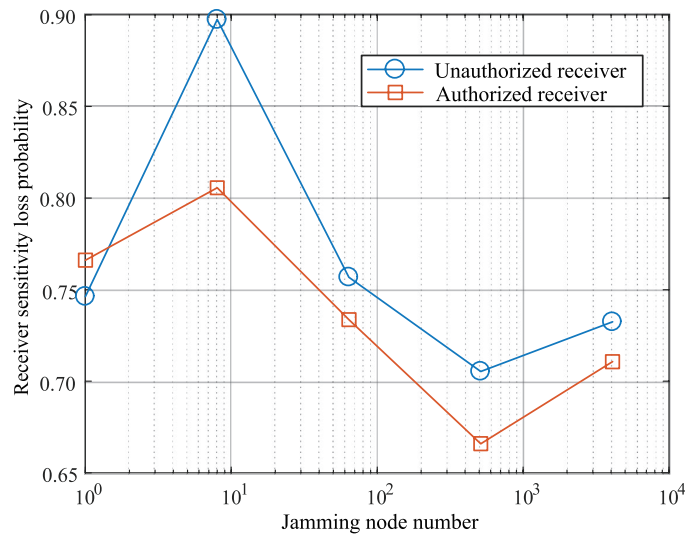


图 9 (网络版彩图) 授权和非授权用户接收机灵敏度损失概率与干扰节点数的关系, 概率统计门限为 $\Omega_S = 46.8$ dB 和 $\Omega_A = 9.3$ dB

Figure 9 (Color online) Relationship between the sensitivity loss probability of authorized and unauthorized user receivers and the number of interference nodes. The probability and statistical threshold is $\Omega_S = 46.8$ dB and $\Omega_A = 9.3$ dB

点附近的非授权用户接收机灵敏度损失大于 Ω_S ; 当干扰节点数增加时, 干扰功率被分散开来, 灵敏度概率损失大于的区域会增加; 当干扰节点数过大时, 干扰功率过于分散, 灵敏度概率损失大于 Ω_S 的区域反而会减少. 特别需要注意的是, 当干扰节点继续增大时, 接收机灵敏度损失概率又会逐步提高. 从仿真图上看, 存在一个极大值点, 此极大值点即是最优干扰节点数.

图 10 给出了授权和非授权用户接收机灵敏度损失平均值与干扰节点数的关系. 随着干扰节点数的增加, 授权和非授权用户接收机灵敏度损失平均值会先增加后减少. 对于非授权用户接收机, 造成上述现象的原因为: 当干扰节点数较少时, 不能有效干扰距离较远的非授权用户; 当干扰节点数增加时, 干扰功率被分散开来, 能有效干扰距离较远的非授权用户; 当干扰节点数过大时, 干扰功率过于分散, 不能有效干扰距离较远的非授权用户. 上述现象说明, 当电磁频谱伞罩内总干扰辐射功率一定时, 干扰节点数存在一个最优值, 该值需要保证干扰功率足够分散, 但不能过于分散, 以致不能够有效的干扰非授权用户接收机.

图 11 给出了授权和非授权用户接收机灵敏度损失均方差与干扰节点数的关系. 随着干扰节点数的增加, 授权和非授权用户接收机灵敏度损失均方差会先减小后增加. 然后随着干扰节点的进一步增加, 授权和非授权用户接收机灵敏度损失均方差会进一步减小. 造成上述现象的原因是: 由于干扰节点数平均分布, 当干扰节点数过少时, 接收机灵敏度损失差异较大, 当逐渐增加时, 接收机灵敏度损失差异又会变小; 但是电磁频谱伞罩是圆柱体, 当干扰节点数平均分布时, 在圆柱体边缘会损失功率, 因此干扰节点数进一步增加时, 接收机灵敏度损失差异又会变大, 而当干扰节点数非常大时, 各个区域的接收机灵敏度损失非常近似, 因此接收机灵敏度损失均方差又开始减小.

图 12 给出了电磁频谱伞罩干扰效能 η 与干扰节点数的关系. 灵敏度损失概率统计门限设置为 $\Omega_S = 41.8$ dB 和 $\Omega_A = 14.3$ dB. 当干扰节点数适当多时, 电磁频谱伞罩干扰效能达到最大. 当干扰节点数进一步增加时, 频谱伞罩干扰效能 η 逐渐降低.

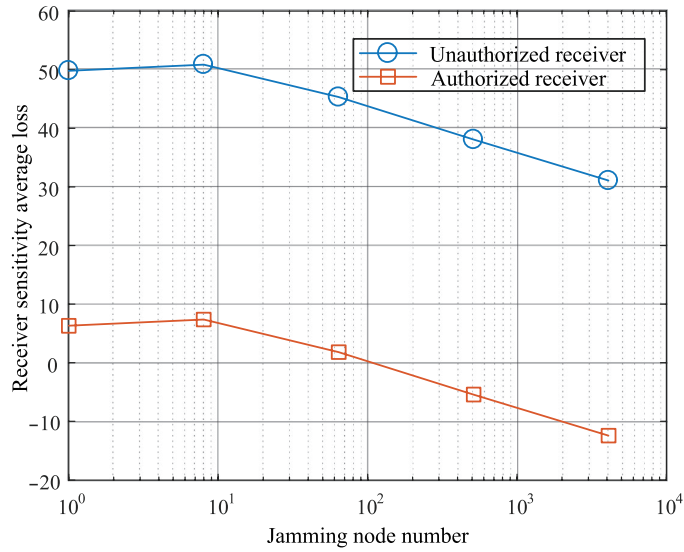


图 10 (网络版彩图) 授权和非授权用户接收机灵敏度损失平均值与干扰节点数的关系

Figure 10 (Color online) Relationship between the average loss of sensitivity and the number of interference nodes in authorized and unauthorized user receivers

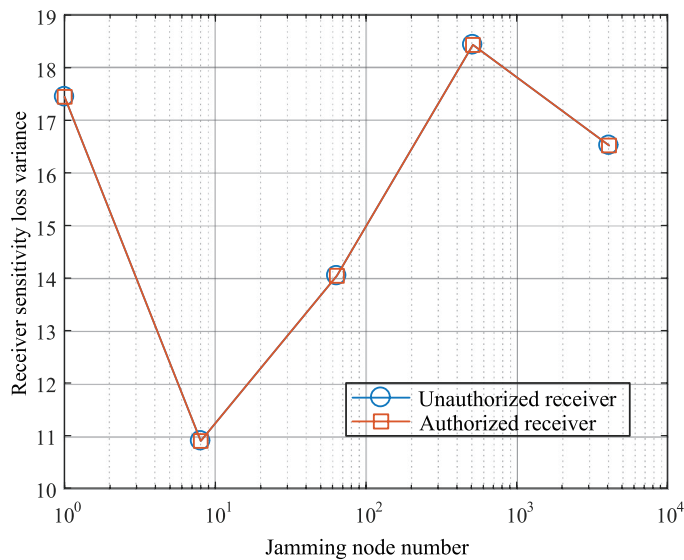


图 11 (网络版彩图) 授权和非授权用户接收机灵敏度损失均方差与干扰节点数的关系

Figure 11 (Color online) Relationship between the RMS of sensitivity loss and the number of interference nodes in authorized and unauthorized user receivers

5.2 实验验证

图 13 给出了电磁频谱伞罩的实验场景示意图, 包括一个干扰发射机、一个通信发射机、一个授权用户接收机和一个非授权用户接收机. 通信发射机传输数据给授权用户接收机, 干扰发射机发送与通信载波频率和工作带宽相同的干扰信号. 通信发射机、干扰发射机和授权用户接收机, 使用软件无线电平台实现; FM (frequency modulation) 收音机表示非授权用户接收机.

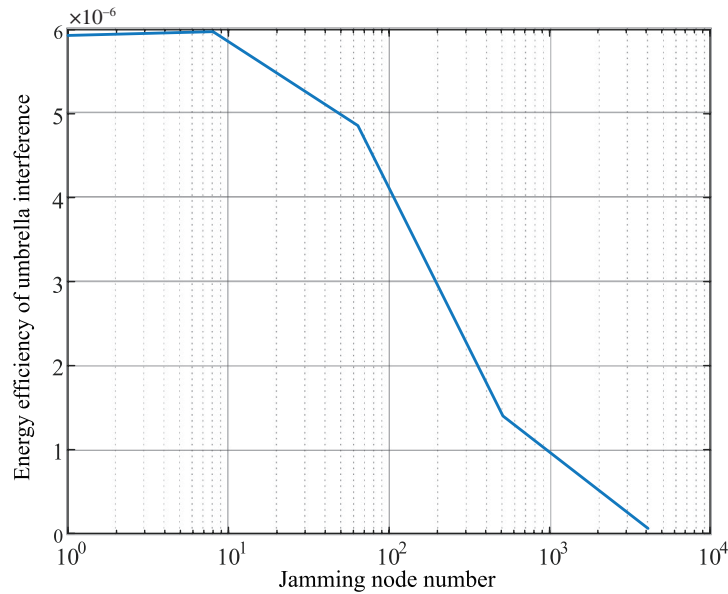


图 12 (网络版彩图) 电磁频谱伞罩干扰效能 η 与干扰节点数的关系, 概率统计门限为 $\Omega_S = 41.8$ dB 和 $\Omega_A = 14.3$ dB

Figure 12 (Color online) Relationship between interference effectiveness of electromagnetic spectrum umbrella η and number of interference nodes. The probability and statistical threshold is $\Omega_S = 41.8$ dB and $\Omega_A = 14.3$ dB

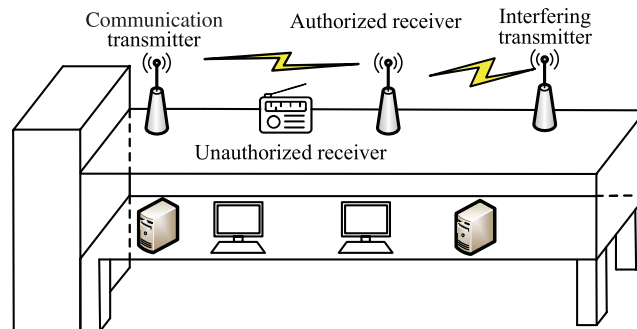


图 13 (网络版彩图) 电磁频谱伞罩实验场景示意图

Figure 13 (Color online) Schematic diagram of the experiment scene of electromagnetic spectrum umbrella

从图 13 的天线位置摆放看, 非授权用户接收机接收到的通信信号功率一般比授权用户接收机大, 而干扰信号功率一般比授权用户接收机小. 因此, 非授权用户接收机的信干噪比一般比授权用户接收机大.

表 1 给出了通信发射机、干扰发射机和授权用户接收机的设备参数. 通信发射机使用 FM 调制语音信号; 授权用户接收机和非授权用户接收机解调接收到的信号并播放语音信号; 干扰发射机发射 M 序列扩频干扰信号.

注意: 授权用户接收机接收到的通信信号功率为 0 dBm, 接收到的伞罩自干扰功率为 -5 dBm. 通信发射机到授权用户接收机的信道传播衰减为 30 dB, 干扰发射机到授权用户接收机的信道传播衰减为 20 dB. 也就是说, 授权用户接收机的干信比为 10 dB, 而非授权用户接收机的干信比小于 10 dB.

接下来, 首先给出伞罩自干扰抑制效果, 然后给出语音通信测试.

表 1 实验设备参数

Table 1 Experimental equipment parameters

Parameters	Communication transmitter	Interfering transmitter	Authorized receiver
Signal sent or received	FM signal	M sequence SPSP signal	Composition
Carrier frequency (MHz)	100	100	100
Working bandwidth (kHz)	25	25	25
Transmitting power (dBm)	15	15	-
Transmitter SNR (dB)	50	50	-
Receiver background noise (dBm)	-80	-	-80

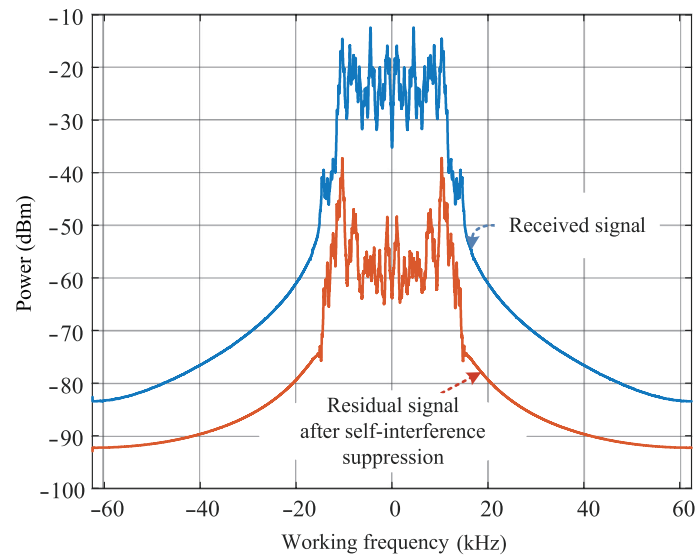


图 14 (网络版彩图) 伞罩自干扰抑制前和抑制后的授权用户接收机信号频谱, 不包含通信信号

Figure 14 (Color online) The spectrum of the authorized receiver signal before and after umbrella interference suppression, excluding the communication signal

(1) 伞罩自干扰抑制

图 14 给出了通信发射机保持静默时, 伞罩自干扰抑制前和抑制后的授权用户接收机信号功率谱. 当授权用户接收机的干噪比为 30 dB 时, 伞罩自干扰抑制制度为 28.5 dB. 当不发送通信信号时, 伞罩自干扰抑制制度与伞罩自干扰发射功率的关系如表 2 所示. 伞罩自干扰抑制制度基本不受伞罩自干扰发射功率的影响.

图 15 给出了通信发射机正常发射 FM 调制语音信号时, 伞罩自干扰抑制前和抑制后的授权用户接收机信号功率谱. 授权用户天线输出端的干信比为 10 dB. 伞罩自干扰被抑制前, 期望的 FM 调制信号被淹没在干扰信号频谱中, 无法正常解调和播放语音信号; 伞罩自干扰抑制后, 能够看到期望的 FM 调制信号频谱轮廓, 可以正常解调和播放语音信号. FM 收音机一直无法正常解调和播放语音信号.

(2) 语音通信测试

首先根据人的主观感受进行语音通信测试, 然后使用语音信号失真度进行量化测试.

伞罩自干扰发射功率为 15 dBm, 伞罩自干扰抑制后, 语音信号质量与期望信号发射功率的关系如表 3 所示. 当发射伞罩自干扰信号时, 授权用户天线输出端的干信比为 10 dB. 通话质量采用判断韵字

表 2 伞罩自干扰抑制与伞罩自干扰发射功率的关系

Table 2 Relation between self-interference suppression system and self-interference emission power of the umbrella

Umbrella self-interfering transmitting power (dBm)	15	12	9	6	3	0
Umbrella self-interference suppression ratio (dB)	28.5	28.5	28.6	28.5	28.5	28.8

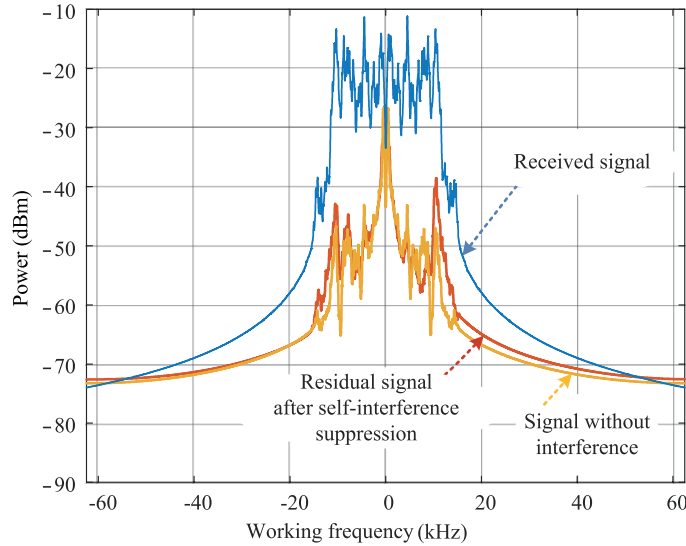


图 15 (网络版彩图) 伞罩自干扰抑制前和抑制后的授权用户接收机信号频谱, 包含通信信号

Figure 15 (Color online) The spectrum of the authorized receiver signal before and after umbrella interference suppression, including the communication signal

表 3 语音信号质量与期望信号发射功率的关系, 伞罩自干扰发射功率为 15 dBm

Table 3 The relationship between speech signal quality and the transmitting power of desired signal. The self-interference emission power of the umbrella is 15 dBm.

Communication signal transmission power (dBm)	15	12	9	6	3	0
Without umbrella self-interfering signal	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
With umbrella self-interfering signal	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent

测试 (diagnostic thyme test, DRT), 即 DRT 为 95% 以上时其清晰度为有优, 85%~94% 为良, 75%~84% 为中, 65%~75% 为差, 65% 以下为不可接受 [21]. 发射与不发射伞罩自干扰时, 随着通信信号功率变小时, 语音信号逐渐变小, 但其通话质量基本保持不变. 说明自干扰抑制能力不受通信信号发射功率影响.

通信发射功率为 15 dBm, 伞罩自干扰抑制后, 语音信号质量与伞罩自干扰发射功率的关系如表 4 所示. 当自干扰功率较大时, 干扰参数估计准确, 重建精度较高, 干扰抑制能力较强; 当自干扰功率较小时, 干扰参数估计误差增大, 重建精度降低, 干扰抑制能力较弱. 但伞罩自干扰抑制后的通信信号信噪比恒定在一个相对较优的水平, 通话质量维持较佳.

定义语音信号失真度为

$$\gamma_c = \frac{\max_{\tau} E [(x_t - \bar{x})(y_{t+\tau} - \bar{y})^*]}{\sqrt{E [(x_t - \bar{x})(x_t - \bar{x})^*]} \sqrt{E [(y_t - \bar{y})(y_t - \bar{y})^*]}}, \quad (24)$$

表 4 语音信号质量与伞罩自干扰发射功率的关系, 通信发射功率为 15 dBm

Table 4 The relationship between sound signal quality and self-interference transmit power of the umbrella. The communication transmit power is 15 dBm.

Self-interfering transmitting power (dBm)	15	12	9	6	3	0
Speech signal quality	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent

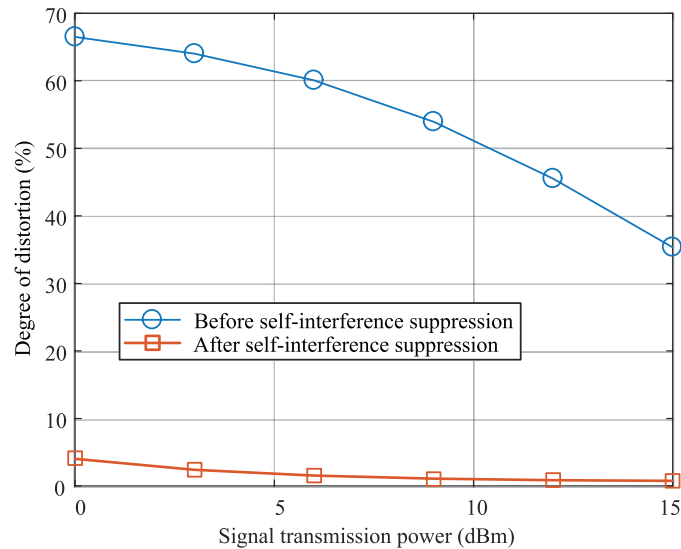


图 16 (网络版彩图) 语音信号失真度与通信发射功率的关系, 伞罩自干扰发射功率为 15 dBm

Figure 16 (Color online) The relationship between the speech signal distortion and the communication transmit power. Umbrella self-interference emission power is 15 dBm

其中 $\bar{x} = E[x_t]$, x_t 为通信发射机发射的语音数据; $\bar{y} = E[y_t]$, y_t 为授权用户接收机接收解调后的语音数据.

图 16 给出了语音信号失真度与通信发射功率的关系, 伞罩自干扰发射功率为 15 dBm. 当发射伞罩自干扰信号时, 授权用户天线输出口的干信比为 10 dB. 可以看出, 自干扰抑制后的语音信号失真度基本不受通信发射功率的影响, 自干扰抑制前的语音信号失真度随着通信发射功率的增加而减小. 相比自干扰抑制前的语音信号失真度, 自干扰抑制后的语音信号失真度改善明显. 该结果说明电磁频谱伞罩能够有效降低非授权用户的语音通话质量, 且不明显降低授权用户的语音通话质量.

图 17 给出了语音信号失真度与伞罩自干扰发射功率的关系, 通信发射功率为 15 dBm. 可以看出, 自干扰抑制后的语音信号失真度基本不受伞罩自干扰发射功率的影响, 自干扰抑制前的语音信号失真度随着伞罩自干扰发射功率的增加而增加. 相比自干扰抑制前的语音信号失真度, 自干扰抑制后的语音信号失真度改善明显. 该结果说明电磁频谱伞罩能够有效的降低非授权用户的语音通话质量, 且不明显降低授权用户的语音通话质量.

6 总结

本文提出了一种电磁频谱伞罩方法. 给出电磁频谱伞罩的构建方法和系统模型; 讨论电磁频谱伞罩节点的自干扰抑制, 干扰设备的互联方法和优化三维布置位置; 根据干扰设备的优化三维位置坐标,

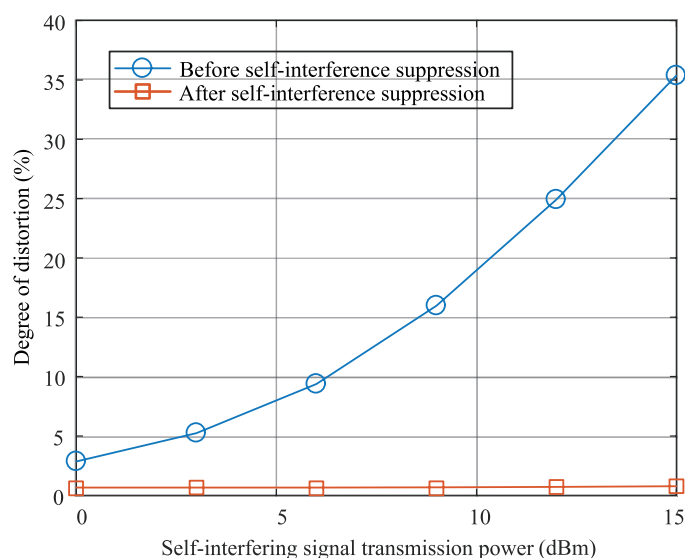


图 17 (网络版彩图) 语音信号失真度与伞罩自干扰发射功率的关系, 通信发射功率为 15 dBm

Figure 17 (Color online) The relationship between the speech signal distortion and the umbrella self-interference transmit power. The communication transmit power is 15 dBm

分析非授权和授权用户接收机灵敏度损失界, 给出电磁频谱伞罩干扰效能评估方程。

数值仿真结果表明, 在干扰辐射功率一定的情况下, 干扰节点数不能太少也不能太多。节点太少, 只能有效干扰节点附近的电磁波设备; 节点太多, 不能有效干扰电磁波设备。搭建了电磁频谱伞罩验证系统, 包括一个干扰发射机、一个通信发射机、一个授权用户接收机和一个非授权用户接收机。伞罩自干扰抑制前, 通信发射机与授权用户接收机的通信被阻塞; 伞罩自干扰抑制后, 通信发射机与授权用户接收机可以正常进行通信。非授权用户接收机一直不能够正常接收通信信号。该结果初步验证了电磁频谱伞罩的可行性。

参考文献

- Poisel R A. Information Warfare and Electronic Warfare Systems. Norwood: Artech House, 2013. 1–139
- Price A, Charles A. War in the Fourth Dimension: US Electronic Warfare, From the Vietnam War to the Present. 2nd ed. London: Greenhill Books, 2001. 20–240
- Price A. The History of US Electronic Warfare, Vol. 1: The Years of Innovation-Beginnings to 1946. Alexandria: Association of Old Crows, 1984. 25–150
- Price A. The History of US Electronic Warfare, Vol. 2: The Renaissance Years, 1946 to 1964. Alexandria: Association of Old Crows, 1989. 30–380
- Schleher D C. Introduction to electronic warfare. IEE Proc F-Commun Radar Signal Process, 1995, 31: 1110–1120
- Molander R C, Riddile A, Wilson P A, et al. Strategic Information Warfare: a New Face of War. California: Rand Corporation, 1996. 11–40
- Browne J P R, Thurbon M T. Electronic Warfare (Brassey's Air Power: Aircraft, Weapons Systems & Technology Series). Oxford: Potomac Books Inc., 1998. 25–350
- Schleher D C. Electronic Warfare in the Information Age. Norwood: Artech House, 1999. 85–145
- Schroer R. Electronic warfare. [A century of powered flight: 1903–2003]. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2003, 18: 49–54
- Bertoli G, Smolenski J, Zablocky P, et al. Convergence of EW capabilities: design the next generation electronic attack (EA) system. In: Proceedings of Phoenix Challenge Conference, 2008

- 11 Bharadia D, Mcmilin E, Katti S. Full duplex radios. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2013, 43: 375–386
- 12 Guan K, Ghanadan R, Dehnie S, et al. Optimal platform placement and configuration in network edelectronic warfare (EW). In: *Proceedings of Military Communications Conference*, San Jose, 2010. 1019–1024
- 13 German G, Spencer Q, Swindlehurst L, et al. Wireless indoor channel modeling: statistical agreement of raytracing simulations and channel sounding measurements. In: *Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Salt Lake City, 2001. 2501–2504
- 14 Zhao S J. *Signal Detection and Estimation Theory*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 12–15 [赵树杰. 信号检测与估计理论. 北京: 清华大学出版社, 2005. 12–15]
- 15 Commander C W, Pardalos P M, Ryabchenko V, et al. The wireless network jamming problem. *J Comb Opt*, 2007, 14: 481–498
- 16 Ahmed N, Huang H. Distributed jammer network: impact and characterization. In: *Proceedings of Military Communications Conference*, Boston, 2009. 1–6
- 17 Basu S, Basu S, Mac Kenzie E, et al. Simultaneous density and electric field fluctuation spectra associated with velocity shears in the auroral oval. *J Geophys Res*, 1988, 93: 115–136
- 18 Gamma D. *EW101: A First Course in Electronic Warfare*. Norwood: Artech House, 2001. 10–25
- 19 Adamy D. *EW102: A Second Course in Electronic Warfare*. Norwood: Artech House, 2004. 45–79
- 20 Luan X Z. *Antennas and Radio Waves Propagation*. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2013. 169–180 [栾秀珍. 天线与无线电波传播. 大连: 大连海事大学出版社, 2013. 169–180]
- 21 Han J Q. *Voice Signal Processing*. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. 157 [韩纪庆. 语音信号处理. 北京: 清华大学出版社, 2013. 157]

Electromagnetic spectrum umbrella

Youxi TANG¹, Lin XU², Fei WU¹, Hongzhi ZHAO^{1*}, Wenbo GUO¹ & Shihai SHAO^{1*}

1. *National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;*

2. *The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China*

* Corresponding author. E-mail: lyn@uestc.edu.cn, ssh@uestc.edu.cn

Abstract In this study, a method for an electromagnetic spectrum umbrella (ESU) is proposed. In the three-dimensional space covered by the ESU, the unlicensed user cannot normally receive the desired electromagnetic wave signal and the authorized user can receive the desired electromagnetic wave signal. The construction method of the ESU is discussed herein. The optimal three-dimensional layout of interference devices is presented. The receiver sensitivity loss of the unlicensed user receiver is analyzed. The structure of the authorized user receiver and its receiver sensitivity loss bound are presented. Finally, simulation and experimental results are provided for demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Keywords electronic war, authorized user, unauthorized user, interference energy efficiency, receiver sensitivity loss



Youxi TANG received his B.E. degree in radar engineering from the College of PLA Ordnance, Shijiazhuang, China, in 1985; he received his M.S. and Ph.D. degrees in communications and information systems from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China, in 1993 and 1997, respectively. He is currently a professor at the National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Elec-

tronic Science and Technology of China. His major research interests are code division multiple access (CDMA), orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), distributed multiple-input-multiple-output (MIMO), and full-duplex communication.



Lin XU was born in 1971 in Meishan, Sichuan, China. He obtained his M.S.E. degree from the University of Science and Technology of China (UESTC), Chengdu, China, in 2008. He is currently a senior research engineer in the 10th Research Institute of the China Electronics Technology Group Corporation. His major research interests are communication signal processing and designing anti-interference broadband communication network systems.



Fei WU was born in 1986 in Jianyang, Sichuan, China. He obtained his B.E. and M.E. degrees from the University of Electronic Science and Technology of China in 2008 and 2011, respectively. He is currently pursuing his doctoral degree. His major research interests are full-duplex communication and self-interference cancellation for wireless communications.



Hongzhi ZHAO received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in communication engineering from the University of Electronic Science and Technology of China, in 2001, 2004, and 2008, respectively. From 2006 to 2008, he was at the Positioning and Wireless Technology Center Laboratory (PWTC Lab) of Nanyang Technology University, Singapore. He is an associate professor at the University of Electronic Science and Technology of China. His major re-

search interests are signal processing of wireless communication and anti-jamming technology.