



·高功率微波技术·

基于低轨卫星的分布式超宽带电磁脉冲 对地面接收机干扰技术*

李永龙, 袁雪林, 刘九龙, 陈正坤, 戴志强

(中山大学 电子与通信工程学院, 广东 深圳 518107)

摘 要: 随着抗干扰技术的不断发展和进步,以阻塞式和欺骗式干扰为代表的传统干扰技术面临挑战。为此,提出了一种基于低轨卫星的分布式超宽带电磁脉冲干扰技术,相比于传统干扰机,超宽带电磁脉冲干扰是一种新型电磁攻击体制。首先,理论推导了重频超宽带电磁脉冲的功率谱;其次,对分布式干扰技术可行性进行分析,并计算了基于低轨卫星平台的分布式干扰所需的发射功率;最后,开展了针对导航接收机低噪声的超宽带电磁脉冲效应实验,并利用 STK(Satellite Tool Kit) 设计了中低纬度下用于搭载超宽带电磁脉冲干扰机的低轨卫星星座布局。实验结果表明, UWB 电磁脉冲可以使低噪声放大器出现暂时增益压缩现象,脉宽为 0.7 ns 的单脉冲可以使导航信号经过低噪声放大器后被压制近 400 ns,重频形式下可以实现信号的完全压制。因此,基于低轨卫星的分布式超宽带电磁脉冲干扰体系可以有效增强干扰效果,有望实现目标区域的全覆盖。

关键词: 超宽带电磁脉冲; 分布式干扰; 导航接收机; 低噪声放大器; 星座设计

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220225

Jamming technology of distributed ultra-wideband electromagnetic pulse to ground receivers based on low-orbit satellites

Li Yonglong, Yuan Xuelin, Liu Jiulong, Chen Zhengkun, Dai Zhiqiang

(School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

Abstract: With the prosperity and progress of anti-jamming technology, traditional jamming technologies represented by barrage and deception jamming are facing challenges. Therefore, a distributed ultra-wideband (UWB) electromagnetic pulse jamming technology based on low-orbit satellites is proposed in this paper. Compared with the traditional jammers, UWB electromagnetic pulse jamming is a new type of electromagnetic attack system. Initially, the power spectrum of repetitive UWB electromagnetic pulse is derived. Furthermore, the feasibility of distributed jamming technology is evaluated, and the transmit power required for distributed jamming based on low-orbit satellites is calculated. Finally, the effect of a low noise amplifier (LNA) in the navigation receiver is investigated in the UWB electromagnetic pulse jamming experiment, and the constellation layout of the low-orbit satellite for carrying jammers at mid-low latitudes is designed by Satellite Tool Kit (STK). The experimental results show that temporary gain compression occurs in the LNA under the jamming of the UWB electromagnetic pulse. UWB single pulse with a width of 0.7 ns can suppress the navigation signal by nearly 400 ns after through the LNA, and the signal can be completely suppressed under repetitive frequency. Consequently, the distributed UWB electromagnetic pulse jamming system based on low-orbit satellites can effectively enhance the jamming effect, which has the potential to achieve full coverage of the target area.

Key words: UWB electromagnetic pulse, distributed jamming, navigation receiver, low noise amplifier, constellation design

* 收稿日期: 2022-12-26; 修订日期: 2023-01-04

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2019B111101001); 国防科技创新特区项目 (20-163-00-KX-003-001-02)

联系方式: 李永龙, liyong27@mail2.sysu.edu.cn。

通信作者: 袁雪林, yuanxlin3@mail.sysu.edu.cn。

传统的大功率集中式干扰系统因其体积大、机动性差、干扰覆盖范围小、干扰源明显,难以满足日益增长且复杂多变的空任务需要^[1]。因此,电子对抗朝着智能化和分布式的方向发展。与传统集中式干扰体系相比,分布式体系利用其数量和空间优势,拥有更高的机动性和更广的干扰覆盖面积;同时,有效降低了单位干扰单元的发射功率,拥有更好的隐蔽性。分布式干扰可以利用无人机、低轨卫星等空中平台作为载体,通过分析决策和通信链路实现各干扰机的协同干扰,在最短的时间内使得干扰范围覆盖干扰目标,不仅可以用于自卫,也可用于建立掩护干扰以保护目标,实现“以面对点”或者“以面对面”的分布优势。

国内外研究人员已针对分布式干扰进行大量研究。文献[2]研究了跳时脉位调制的UWB脉冲信号对GPS接收机的干扰机理,结果表明,脉冲重复频率越大,进入GPS接收机的干扰信号能量越多,干扰效果越明显;文献[3]和文献[4]阐述了分布式干扰体系的优势及其关键技术,并推导了该体系下的功率合成公式,为分布式干扰机提供了技术支持;文献[5]分析了基于无人机的分布式干扰模型,实验结果显示了拱形编队的优越性,更多的干扰功率可以从接收天线的主瓣进入;文献[6]研究了在不同分布形状干扰下雷达暴露区的变化规律,表明分布式干扰对相控阵雷达有很好的干扰效果;文献[7]通过遗传算法和粒子群算法解决卫星导航分布式压制干扰资源调度问题,充分发挥了分布式干扰作战效能。现有成果对分布式干扰体系、功率合成、资源分配等方面进行了深入研究,但鲜见关于UWB电磁脉冲的分布式干扰技术研究。UWB电磁脉冲信号具有极窄的脉冲宽度和非常宽的频谱,能同时覆盖GPS的多个工作频段,可对GPS信号实施全频段干扰。而低轨卫星作为特殊的天基对象,具有特殊的空间位置,能够作为干扰机载体,完成距离更远、范围更广的干扰任务。本文根据重频超宽带电磁脉冲的功率谱及干扰机理,提出基于低轨卫星的UWB电磁脉冲分布式干扰体系,并计算了卫星所需发射功率,最后通过实验得到了UWB电磁脉冲对导航接收机低噪放的干扰效果,利用STK仿真了基于低轨卫星的UWB电磁脉冲干扰机的分布式布局。

1 重频超宽带电磁脉冲

1.1 功率谱推导

UWB电磁脉冲一般情况下是指上升时间和持续时间在ns或亚ns量级,频谱范围在几十MHz到几GHz的电磁波,具有前沿快、脉宽窄、频谱宽的特点^[8]。考虑到工程的实际应用,发射波形主要采用高斯脉冲的二阶导数函数^[2,9]

$$x(t) = A \frac{4\pi}{T^4} (4\pi t^2 - T^2) e^{-\frac{2\pi t}{T}} \quad (1)$$

式中: A 表示为脉冲幅值, T 表示为脉冲宽度,则重频UWB电磁脉冲序列可以表示为

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x\left(t - n \frac{1}{f_{\text{prf}}}\right) \leftrightarrow Y(f) = F\{y(t)\} = f_{\text{prf}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(f) \delta(f - kf) \quad (2)$$

式中: $Y(f)$ 和 $X(f)$ 分别为 $y(t)$ 和 $x(t)$ 的傅里叶变换, f_{prf} 为脉冲重复频率, k 为整数, δ 为冲激函数。则重频UWB电磁脉冲的功率谱为

$$P(f) = \frac{|Y(f)|^2}{\eta_0} = \frac{f_{\text{prf}}^2}{\eta_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X^2(f) \delta(f - nf_{\text{prf}}) \quad (3)$$

式中: η_0 为自由空间波阻抗。当 $T = 1 \text{ ns}$, $f_{\text{prf}} = 1 \text{ MHz}$ 时,得到如图1所示UWB脉冲序列归一化波形及功率谱密度(PSD)。

由式(3)可知,重频UWB电磁脉冲功率与其脉宽、幅值、重频息息相关。结合重频UWB电磁脉冲的可分解性,可以通过同步触发的方式进行幅值合成或等间隔触发的方式进行重频合成,为UWB分布式干扰体系功率合成提供了理论依据。

1.2 干扰机理分析

导航接收机典型的射频前端框图如图2所示^[10]。信号被导航接收机接收后,先经低噪声放大器(LNA)放大,再经带通滤波器(BPF)去除带外干扰,经混频器与本地振荡器产生的正弦信号进行混频以降低载波频率,再经带通滤波器滤除带外信号分量,最后通过ADC采样将中频信号传至上位机。

LNA器件位于接收机前端,是射频前端链路的核心器件,但同时也是最容易受到来自前门耦合路径的电磁脉

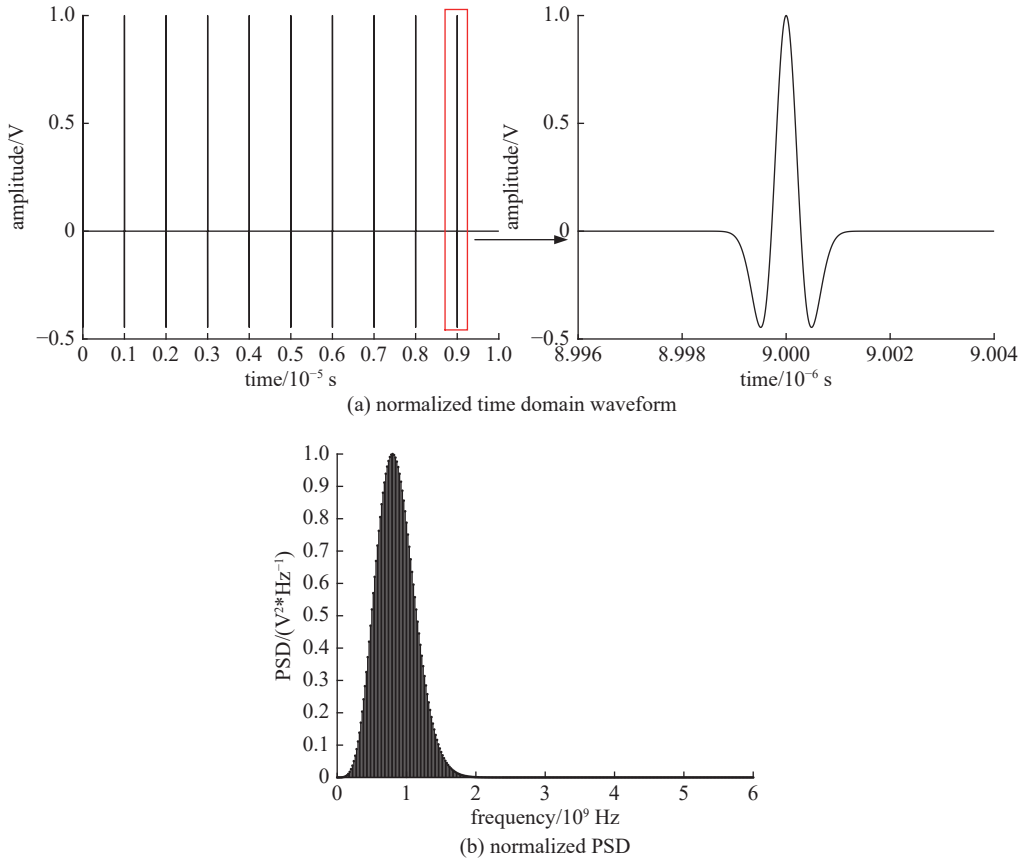


Fig. 1 Time-frequency characteristics of UWB pulse sequence at $T=1$ ns and $f_{\text{prf}}=1$ MHz

图 1 $T=1$ ns, $f_{\text{prf}}=1$ MHz 时的 UWB 电磁脉冲序列时频特性

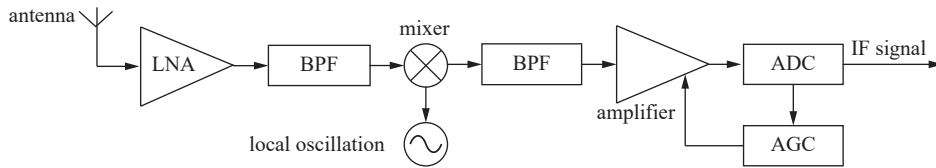


Fig. 2 Block diagram of the RF front-end of the navigation receiver

图 2 导航接收机射频前端框图

冲干扰的器件。接收机的 LNA 等半导体器件随着输入功率的增加,工作区域分为线性区、饱和区和击穿区,如图 3 所示。在正常信号输入情况下,输入功率较低,器件处于线性工作状态,正常信号得到有效放大。传统干扰机工作在线性区,在接收机的信号处理层面实施干扰,使其无法正常工作。随着输入功率的增加,器件进入非线性工作的饱和区,输出信号与输入信号不再呈线性关系,产生饱和效应。而高功率微波 (HPM) 物理场会导致放大器工作在击穿区,超高的能量进入接收机,通过场强击穿或热积累损毁接收机。

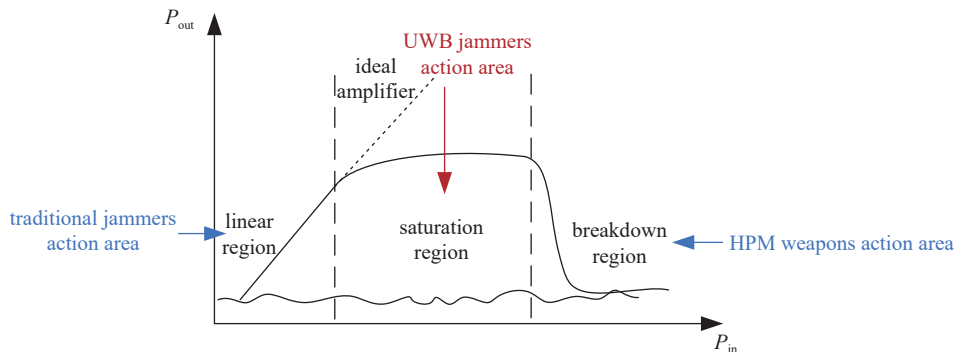


Fig. 3 Schematic diagram of nonlinear compression of amplifier

图 3 放大器的非线性压缩示意图

研究表明,当强电磁脉冲注入时,LNA中的核心半导体器件的能带和载流子分布会发生明显的变化。受器件内各种散射和温度升高的影响,电子迁移率降低,导致LNA的直流特性、小信号增益和射频输出特性降低,输出三阶交点增加,从而使LNA工作在非线性区^[11-13]。当LNA注入功率小于某一阈值时,LNA的非线性退化是可恢复的,当LNA注入功率大于某一阈值时,电路中的器件将被烧毁。

UWB电磁脉冲的作用机理主要是利用了导航接收机射频前端的LNA在UWB电磁脉冲的干扰下出现的饱和效应,从而使得接收机无法接收到有用信号^[14],是一种不同于传统干扰的技术。由于UWB信号具有非常宽的带宽,可以覆盖整个接收机的频带,天线耦合量大,滤波器不会完全抑制UWB干扰^[2,15]。当UWB电磁脉冲通过天线进入导航接收机系统后,由于其瞬时功率水平远高于接收机的接收灵敏度,对LNA等敏感器件造成饱和效应,从而产生高次谐波。然后经过滤波、放大、混频等进一步延时展宽作用,使接收机系统处于饱和状态,其自动增益控制(AGC)输出的控制电压在较长时间内大幅度降低,使接收机增益大幅度降低,从而实现对无线电接收机系统的干扰压制。

2 分布式体系干扰策略

2.1 分布式干扰体系

单台UWB电磁脉冲源对导航接收机干扰效果有限,当作用距离较大时,干扰效果一般。而通过多台干扰机分布式布局进行组合干扰,就可以有效提升干扰效果。相比于传统干扰方式,“分布式”电磁干扰具有更广的干扰覆盖面积,更强的机动性,可以实现特定空域的干扰,且载荷功率需求更小,拥有更好的隐蔽性。此外,分布式干扰可以使干扰能量从多个方向进入到接收机内,大大降低了干扰能量损失。本文主要分析了基于低轨卫星的分布式干扰体系,该体系可以完成更加复杂的干扰任务,甚至是大型卫星难以完成的空间任务。

分布式干扰体系示意图如图4所示,依靠通信链路和分析决策,当收到目标位置信息时,分布式干扰体系分配UWB子干扰机。子干扰机根据资源分配进行协同工作,迅速在干扰目标上方形成干扰扇面或进行一定的组合,同时确定具体干扰参数,在空间进行功率合成或分布式波束形成^[16-18]。理论上最大合成功率率为 $P=N^2P_i$,其中 P_i 为子UWB干扰机辐射功率; N 代表干扰机的个数。实际上,由于UWB电磁脉冲脉宽极窄,时域上进行脉冲叠加需要考虑各干扰机时间同步问题,难度较大,因此通过等间隔触发的方式在频域上进行脉冲重频合成是更为有效的方式。此外,受外界环境因素的影响,干扰信号到达目标接收机的时间和相位存在误差,因此还需要对干扰信号进行时间补偿和相位补偿^[16]。合成后的UWB电磁脉冲进入目标接收机,当能量达到一定值后,三极管、场效应管等半导体器件在UWB电磁脉冲的作用下物理性能发生改变,器件出现饱和效应,导航信号无法有效放大。

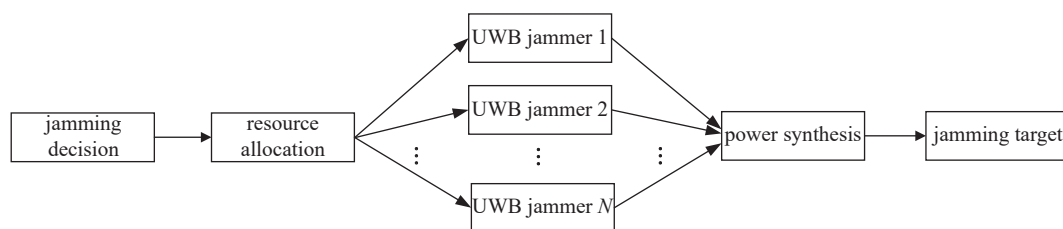


Fig. 4 Schematic diagram of distributed UWB pulse jamming system

图4 分布式UWB电磁脉冲干扰体系示意图

2.2 低轨卫星干扰平台发射功率计算

以干扰GPS接收机为例,GPS接收机与UWB干扰源距离为 d 时,接收信号功率

$$P_R(\text{dB}) = P_T(\text{dB}) + G_T(\text{dB}) + G_R(\text{dB}) - L_S(\text{dB}) - L_T(\text{dB}) - L_M(\text{dB}) \quad (4)$$

式中: P_T 为发射功率, G_T 为发射天线增益, G_R 为接收天线增益, L_S 为自由空间的传播损耗, L_T 为分路滤波器和馈线引入的损耗, L_M 为干扰信号在大气层传输过程中受到的损耗。

假设UWB干扰源以垂直地球高度 h 为500 km的低轨卫星为载体,干扰GPS L1波段, $f_0=1575.42$ MHz,低轨卫星覆盖地球的张角 α 为 28° ,到边沿距离 l 约516 km。由电磁波在自由空间损耗和天线的放大倍数计算公式可得: $L_S=150.65$ dB;考虑实际情况,放大倍数 N_0 取一半,则 $N_0=15.18$ dB。

已知接收机的最大灵敏度为 -158.5 dBW,假设在不考虑空间功率合成效率、大气衰减、环境噪声等其它因素时,则接收机能接收到UWB电磁脉冲信号的最小功率为 -23.03 dBW。

因此,为了实施有效干扰,致使干信比(J/S)分别为30、90、125 dB下的终端用户的干扰功能,低轨卫星干扰平台发射的功率计算结果如表1所示。由表1可知,干信比越大所需合成功率越大。假设单颗低轨卫星的发射功率为10 dBW,当卫星高度为500 km,覆盖地球的张角为28°时,理论上十台UWB干扰机进行空间功率合成就能使得目标区域干信比达到120 dB。当部署的卫星数量更多时,可以将每颗卫星覆盖地球表面的张角和边沿距离设置得更小,这样单颗低轨卫星就可以节省更多的功率资源,但同时单颗低轨卫星对目标区域的覆盖范围也会减小。

表1 当 $h=500\text{ km}$, $\alpha=28^\circ$ 时,各干信比下的所需最小合成功率

Table 1 Minimum synthetic power required under different JSR at $h=500\text{ km}$ and $\alpha=28^\circ$

(J/S)/dB	minimum synthetic power/dBW
30	6.97
90	66.97
125	101.97

3 实验与仿真分析

3.1 UWB 电磁脉冲对导航接收机的压制

为了能更广泛搭载各种空中平台,脉冲源的小型化、高稳定性、轻质量和高可靠性等成为UWB电磁脉冲源研制的关键。通过理论计算和实验,结合半导体器件与Marx发生器的优点,将大功率半导体固态器件作为Marx发生器的主开关,取代经典的火花开关,原理如图5所示。并采取欠电荷充电法,减小级间电容容值,使其电荷在级联雪崩过程中迅速释放完毕,有效消除了电路内部反射,改善了脉冲波形和稳定度。图6为本文采用的UWB电磁脉冲源,输出的脉冲具有幅度高、重频高、前沿快、脉冲窄、稳定度高等特点,且脉冲源电路结构紧凑、体积小、核心电路质量仅为50 g。干扰机工作稳定可靠,通过高压强制同步触发技术,提高了脉冲源的稳定度,使脉冲稳定度由ns量级提高到20 ps以内。因此,可将众多体积小、质量轻的小型UWB干扰机分布在特定的空域上,为分布式UWB电磁脉冲干扰提供了条件。

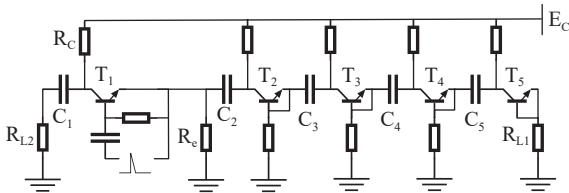


Fig. 5 Schematic of Marx circuit
图5 Marx电路原理图

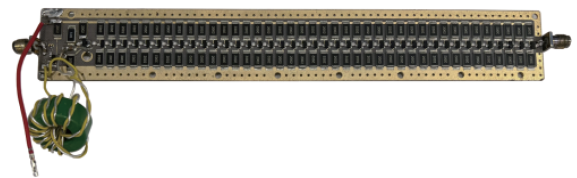


Fig. 6 Core circuit of UWB electromagnetic pulse source
图6 UWB电磁脉冲源核心电路

对导航接收机中的LNA器件进行效应实验,实验时直接对接收机射频前端电路注入UWB电磁脉冲。图7为UWB干扰机经过60 dB衰减后输出的波形图,图中可以看出,UWB波形脉宽小于1 ns,上升沿小于150 ps。

实验结果表明,在单脉冲干扰情况下,导航信号经过低噪放输出后,受压制情况与UWB电磁脉冲的幅值有很大关系。当衰减60 dB时,UWB电磁脉冲幅值约为2 V,导航信号被压制近400 ns,如图8所示。在实现相同压制效果的情况下,UWB电磁脉冲幅值越大,所需要的重频越低。以C/A码为例,其码长为1023 bit,码源宽度为1 μs ,周期约为1 ms。当脉冲幅值为2 V,重频为250 kHz时,信号被压制时长超过10%,一般情况下可认为该信号不可信或无用。

以上结果表明,不考虑合成效率时,分布式干扰机越多,对接收机的压制效果越强。实际上,由于饱和作用,

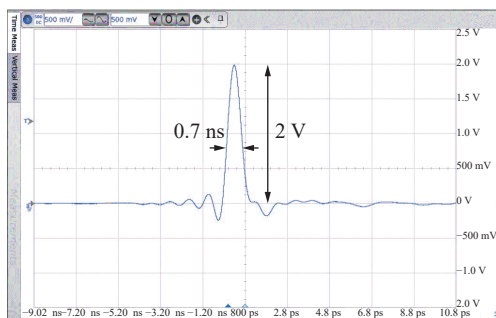


Fig. 7 UWB output waveform after 60 dB attenuation
图7 60 dB衰减后UWB输出波形

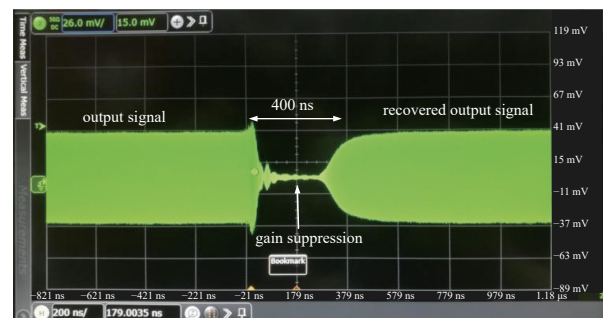


Fig. 8 LNA jamming effect experiment
图8 LNA效应实验

信号经过混频、滤波、放大等作用,脉冲宽度会被进一步拓展^[14]。即一个脉冲宽度约为 1 ns 的电磁脉冲,接收机受到的饱和效应会进一步延长到 μs 量级,当电磁脉冲重频达到数十 kHz 或者数百 kHz 时就能对电子系统造成较强的干扰压制。因此,分布式干扰可以采用合成脉冲幅值和重频的方式,对目标实施干扰,以达到最理想的干扰效果。

3.2 低轨卫星星座设计仿真和覆盖重数

UWB 电磁脉冲采用低轨卫星作为载体,利用 STK 软件进行星座设计。低轨卫星星座采用倾斜轨道星座设计,1920 颗卫星均匀分布在轨道高度为 500 km,倾角为 55° 的 32 个近圆轨道平面上,同一个轨道平面上的相邻两颗卫星之间的相位差为 6° ,相邻两个轨道平面升交点赤经间隔差为 11.25° 。同时考虑到卫星天线增益,设信号播发的张角为 28° 。星座分布、信号覆盖示意图和星下点轨迹示意图如图 9 所示。

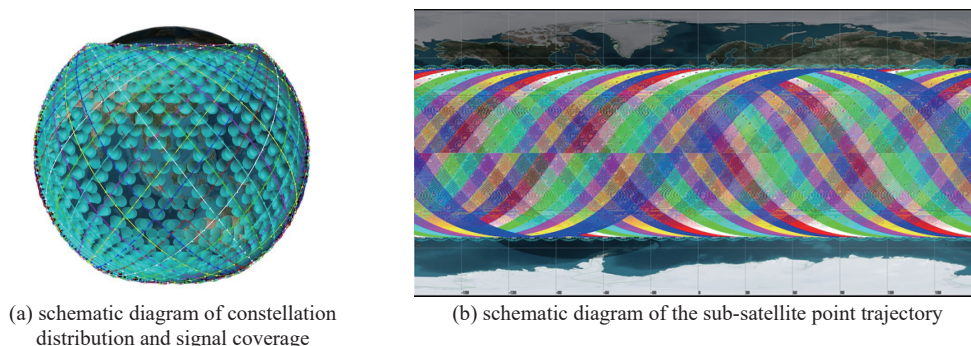


Fig. 9 Constellation design

图 9 星座设计

设卫星轨道高度角截止为 5° ,分别选取纬度为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 的区域,计算低轨卫星星座在该纬度区域的覆盖情况,各区域卫星覆盖重数如表 2 所示。

图 10 展示了纬度为 20° 和纬度为 50° 的卫星覆盖重数。其中横坐标代表时间,采样间隔为 1 min,仿真数据长度为 1 d,纵坐标为区域可被信号覆盖的卫星数。由仿真结果可以看出,当低轨卫星星座按照 1920 颗/32 个/

表 2 中低纬度卫星覆盖重数

Table 2 Multi-coverage of mid-low latitudes satellite

latitude/ $^\circ$	minimum visible satellites	maximum visible satellites	average visible satellites
0	31.0	39	36.2
10	34	41.1	37.2
20	31.0	39.1	36.2
30	45.0	53.0	49.2
40	68.0	75.0	71.5
50	64.0	71.0	67.6
60	43.0	50.0	46.2

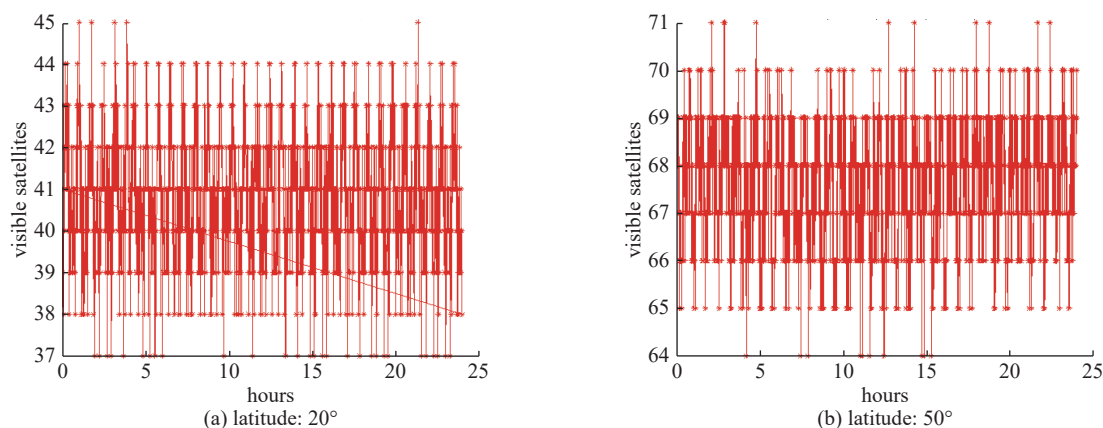


Fig. 10 Multi-coverage of satellites

图 10 卫星覆盖重数

55°/500 km 设计,在中低纬度区间,地面平均可视星数在 31~71 颗之间。当同区域卫星覆盖重数更多时,单颗卫星信号播发功率可以再次降低,覆盖面积也可以得到扩大。

4 结 论

本文介绍了一种基于低轨卫星的分布式 UWB 干扰体系,通过推导重频 UWB 电磁脉冲的功率谱和分析其干扰机理,提出基于低轨卫星的分布式 UWB 电磁脉冲干扰技术,并计算了卫星所需发射功率。最后通过导航接收机 LNA 效应实验得出结论:随着分布式子干扰机合成幅值的增大,信号经过低噪放后被压制的时间越长。脉宽为 0.7 ns,幅值为 2 V,重频为 250 kHz 的 UWB 单脉冲可以使导航信号不可信或无用,且在得到相同压制情况下,UWB 电磁脉冲幅值越大,所需要的重频越低。此外,通过 STK 仿真软件,设计了用于搭载 UWB 干扰机的低轨卫星星座,采用分布式布局合成 UWB 电磁脉冲幅值或重频,可以有效降低单颗卫星信号播发功率,利用多颗卫星,针对同一目标,实现“以面对点”或“以面对面”的分布式干扰,以达到最理想的干扰效果。综上,分布式干扰在距离和功率上具有明显优势,对我国国土防御具有重要意义。

参考文献:

- [1] Yan Dashuang, Ni Shuyan. Overview of anti-jamming technologies for satellite navigation systems[C]//Proceedings of 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). 2022: 118-124.
- [2] Huang Xin, Chen Yazhou, Wang Yuming. Simulation of interference effects of UWB pulse signal to the GPS receiver[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021, 2021: 9935543.
- [3] 石玉彬. 分布式干扰技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013. (Shi Yubin. The study of distributed jamming[D]. Xi'an: Xidian University, 2013)
- [4] 田明浩. 星载GPS相关干扰技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008. (Tian Minghao. Research on the technology of correlation interference for GPS based on the star carry platform[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008)
- [5] Zhang Zhengyi, Tao Mingliang, Gong Yanyun, et al. Performance evaluation for UAV-based distributed jamming system: an illustrative example[C]//Proceedings of 2021 IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). 2021: 441-444.
- [6] 杨勇. 防空反导雷达干扰与评估研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. (Yang Yong. Research on jamming and evaluation of air defense and anti-missile radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2019)
- [7] Luo Zhaoyi, Deng Min, Yao Zhiqiang, et al. Distributed blanket jamming resource scheduling for satellite navigation based on particle swarm optimization and genetic algorithm[C]//Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). 2020: 611-616.
- [8] 杨猛, 宁辉, 张永栋, 等. 重频超宽带脉冲干扰低噪声放大器[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 083004. (Yang Meng, Ning Hui, Zhang Yongdong, et al. Interference effects of repetitive ultra-wideband pulses on low noise amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 083004)
- [9] 孙正淳. 基于雪崩三极管Marx脉冲源的抖动抑制与峰值功率合成[D]. 成都: 电子科技大学, 2021. (Sun Zhengchun. Jitter suppression and peak power synthesis based on avalanche transistor Marx pulse source[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021)
- [10] 张凯轩, 郭承军. GNSS导航接收机射频前端技术综述[C]//第十一届中国卫星导航年会. 2020. (Zhang Kaixuan, Guo Chengjun. Overview of RF front end technology for GNSS navigation receiver[C]//Proceedings of the 11th China Satellite Navigation Annual Conference. 2020)
- [11] Qin Yingshuo, Chai Changchun, Li Fuxing, et al. Study of self-heating and high-power microwave effects for enhancement-mode p-gate GaN HEMT[J]. Micromachines, 2022, 13: 106.
- [12] Li Fuxing, Chai Changchun, Wu Han, et al. Study on high power microwave nonlinear effects and degradation characteristics of C-band low noise amplifier[J]. Microelectronics Reliability, 2022, 128: 114427.
- [13] Lin Qian, Jia Lining, Wu Haifeng, et al. Investigation on temperature behavior for a GaAs E-pHEMT MMIC LNA[J]. Micromachines, 2022, 13: 1121.
- [14] 袁健锋, 陈正坤, 蔡佳炜, 等. 基于超宽带电磁脉冲的导航干扰[C]//第七届全国脉冲功率会议暨第八届全国特种电源学术交流会. 2021. (Yuan Jianfeng, Chen Zhengkun, Cai Jiawei, et al. Navigation interference based on ultra-wide band electromagnetic pulse[C]//Proceedings of the 7th National Pulse Power Conference and the 8th National Special Power Supply Academic Exchange Conference. 2021)
- [15] Sakharov K Y, Sukhov A V, Ugolev V L, et al. Study of UWB electromagnetic pulse impact on commercial unmanned aerial vehicle[C]//Proceedings of 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). 2018: 40-43.
- [16] 鞠涛, 黄高明, 满欣. 任意分散布阵通信干扰机空间功率合成方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(8): 57-61,67. (Ju Tao, Huang Gaoming, Man Xin. A spatial power synthetic method for random distributed array communication jammers[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(8): 57-61,67)
- [17] 袁雪林, 徐哲锋, 张洪德, 等. UWB冲激雷达全固态高重频脉冲源设计[J]. 微波学报, 2008, 24(5): 35-39. (Yuan Xuelin, Xu Zhefeng, Zhang Hongde, et al. Design of the full-solid high-repeatability pulser in UWB impulse radar[J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(5): 35-39)
- [18] 相已琪. 基于有限反馈的分布式干扰波束形成[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. (Xiang Siqu. Distributed inference beamforming based on finite feedback[D]. Xi'an: Xidian University, 2019)