

基于平均可工作概率的星间链路整网抗干扰性能评估方法*

韩其位, 聂俊伟, 刘文祥, 王飞雪

(国防科技大学 卫星导航研发中心, 湖南 长沙 410073)

摘要: 导航战条件下的全系统自主导航运行是卫星导航系统星间链路建设的重要目标之一。对星间链路在导航战情况下的工作性能进行准确评估具有非常重要的意义。星间链路的整网抗干扰性能与单星抗干扰能力、星间信号体制、建链策略、网络体制等多种因素均有关系, 比较复杂, 从而为其准确评估带来很大困难。为准确评估导航战条件下星间链路的整网抗干扰性能, 对影响星间链路整网抗干扰性能的各种因素进行分析, 并在此基础上对整网抗干扰性能评估场景进行建模设计。提出了以干扰场景遍历条件下的平均可工作概率为指标的星间链路抗干扰性能评估方法, 定义了可用率评估指标体系, 从而使准确、定量评估星间链路整网抗干扰性能成为可能。

关键词: 星间链路; 可工作概率; 性能评估; 抗干扰

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)04-0097-06

Performance evaluation method based on average availability for inter-satellite links system

HAN Qiwei, NIE Junwei, LIU Wenxiang, WANG Feixue

(Satellite Navigation R & D Center, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Independent and autonomous running of the entire GNSS system in navigation warfare is one of the most important aims of building inter-satellite links. However, it is inevitable that inter-satellite links will be faced with the threats from jams in navigation warfare, which may result in performance declining, or even breaking down. Therefore, exact evaluation of anti-jamming performance is very important. Anti-jamming performance evaluation of inter-satellite links system is much more difficult than other objects, as it is related to almost every aspect of the system, such as the design of signal system, network, linking strategy, equipment performance, and so on. In order to accurately evaluate the anti-interference performance of the entire inter-satellite links network under the conditions of navigation warfare, this study firstly analyzed a variety of factors which affect the anti-jamming performance of inter-satellite links. On this basis, test scenarios for anti-jamming performance evaluation was modeled and designed. And then an evaluation method for anti-jamming performance of inter-satellite links system based on average availability was proposed, and the index system for availability evaluation was defined, which made accurate and quantitative evaluation of anti-jamming performance of the entire inter-satellite links network possible.

Key words: inter-satellite links; availability; performance evaluation; anti-jamming

星间链路系统是卫星导航系统的重要组成部分^[1-5]。在未来导航战背景下, 卫星导航系统可能受到各种人为或意外干扰。而星间链路作为增强系统导航战能力的重要组成部分, 必然会成为恶意干扰的对象, 从而导致整个导航系统的性能下降甚至无法正常工作。为此, 需要对星间链路抗干扰性能进行准确、定量、全面的评估。

星间链路抗干扰性能评估包括单机抗干扰性能评估和整网抗干扰性能评估两个环节。星间单机抗干扰性能的准确、定量评估可按照普通接收终端抗干扰性能评估的成熟方法进行^[6-7], 但整网

抗干扰性能由于涉及因素较多, 机理复杂, 准确全面地评估非常困难, 尚无可用方法。而单星的抗干扰性能评估结果缺乏实质性意义, 整网性能才会对卫星导航系统产生影响, 整网抗干扰性能评估才具有实质性意义。

针对通信网网络拓扑复杂的特点, 文献[8]提出了一种快速评价通信网可靠性的方法, 给出了可靠性定量计算的数学解析式, 能反映网络拓扑的可靠性和抗毁性。文献[9]利用系统工程的方法对通信网的可靠性问题进行分级分层划分, 以便进行具体的可操作性研究。文献[10]运用

* 收稿日期: 2013-01-29

基金项目: 中国第二代卫星导航系统重大专项项目

作者简介: 韩其位(1986—), 男, 甘肃张掖人, 博士研究生, E-mail: hanqiweialex@163.com;

王飞雪(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: fxwang@nudt.edu.cn

灰色系统理论对通信网的抗干扰性能进行了综合分析。文献[11]提出利用随时间变化的状态概率矩阵对雷达网的动态抗干扰性能进行评估。文献[12]根据信息原理提出了一种综合评估雷达网抗干扰性能的方法,并给出了相应数学模型,该方法为雷达网性能评估提供了一种通用可行的思路。通信网和雷达网的抗干扰评估方法可为星间链路整网抗干扰性能评估提供一定参考,其整网评估的思想可以提供借鉴,但后者更为复杂,并不适用。文献[13-14]以卫星信号可用率为指标,随机产生信号和干扰的方向,评估 GPS 自适应阵的抗干扰性能。文献[15]采用平均信噪比损耗为性能指标,评估了时域-空域-极化域联合抗干扰的性能。在总结前人研究基础上,文献[16-17]提出了可用率的规范定义,具体包括平均可用率、干扰方向条件可用率、信号方向条件可用率等指标。文献[18-19]研究了 GNSS 天线阵抗干扰接收机单信号可用率指标的测试方法,提出了一种高效的测试方法,测试效率大为提升,为可用率指标的工程化推广打下了良好基础。基于可用率的天线阵抗干扰性能评估方法(对各种测试场景进行遍历,从而实现准确完备的性能评估)对星间链路整网抗干扰性能评估提供了有益的参考,但后者更为复杂,需要针对星间链路自身特点,建立全新的整套评估指标体系、场景设计方法及评估方法。

1 星间链路整网抗干扰性能影响要素

影响星间链路整网抗干扰性能的主要因素有:单星抗干扰性能、网络拓扑结构、被干扰卫星节点重要性等,如图 1 所示。

由于卫星运动导致星座拓扑结构时刻变化,因此,星间链路的整网抗干扰性能也是时刻变化的。

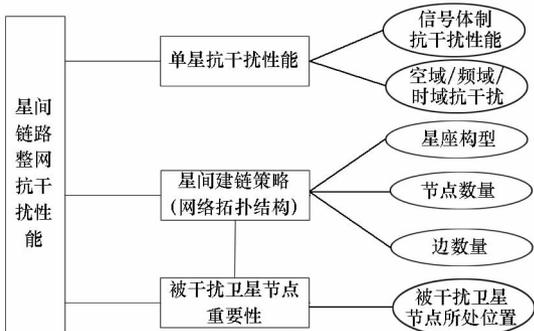


图 1 星间链路整网抗干扰性能的影响因素

Fig. 1 Influencing factors of anti-interference performance of the whole inter-satellite links network

1) 单星抗干扰性能

单星抗干扰性能是整网抗干扰性能的基础;单星抗干扰性能越好,则整网抗干扰性能越好。单星抗干扰性能主要指卫星接收链路的接收特性,包括扩频信号体制本身的抗干扰能力以及空域/频域/时域抗干扰技术带来的抗干扰性能提升。除最大干扰容限外,对于通信而言,单星抗干扰性能指标主要指抗干扰后的误码率性能。

2) 星间建链策略

星间建链策略决定星间网络拓扑结构。星间建链策略的基本特点是短时建链与稳态建链相结合,星间链路卫星网络拓扑结构随着卫星运动时刻变化。

以典型的 Walker24/3/2 星座为例,同轨道 MEO 卫星间的观测仰角、方位角、星间距离等几何参数都是固定的,当卫星天线角度确定后,同轨道 MEO 卫星的星间可视关系也就随之确定。异轨道 MEO 卫星间的可视性由卫星天线角度决定,且随时间变化。网络拓扑结构包括星座构型、网络节点数量、网络边数量等要素。

(1) 星座构型,即导航星座构型;

(2) 网络节点数量,即卫星数目;

(3) 网络边数量,即星间链路建链总数。

星间建链总数取决于卫星可视性,卫星可视性取决于天线波束指向范围和信号捕获载噪比门限。另外,卫星可视性随着卫星运动时刻变化,因此星间链路建链可建链总数也是随时间变化的。

对于星间通信,节点数越多,边数越多,网络趋于扁平化,其稳健性增强,整网抗干扰性能也增强;对于星间测距,节点数越多,边数越多,定轨观测冗余度越大,整网抗干扰性能也越大。

3) 被干扰卫星节点重要性分布

被干扰卫星节点在网络拓扑中的重要性越高(关键节点),对整网抗干扰性能的影响就越大;被干扰卫星节点在网络拓扑中的重要性越低(非关键节点),对整网抗干扰性能的影响就越小。卫星节点重要性主要取决于节点在网络中的位置以及网络拓扑结构。关键节点失效,对网络性能具有更大的影响。

失效卫星数目相同时,不同卫星失效对整网性能的影响不同。因此,不同卫星节点对整网可靠性的贡献不同,通过分析节点重要性,找出关键节点,有利于更好地评估和优化整网性能。

网络关键节点有多种定义方法,相应地也有多种评价方法。与一般通信网络的节点重要性评估相比,星间链路数据传输网络的节点重要性评

估具有以下特点:

(1)星间链路网络拓扑结构时刻变化,而一般通信网拓扑结构在通常情况下比较稳定。

(2)在正常工作情况下,不同卫星、不同链路之间的可靠性相差不多,基本相同;而普通通信网不同节点、不同链路的可靠性一般不同。

(3)在网络受干扰降效工作的情况下,同卫星相联系的链路可靠性下降情况基本相同;而普通通信网受到干扰后,相同节点的不同链路可靠性恶化情况不同。

根据星间链路数据传输网络的实际工作特点,本文中采用基于节点聚合度的关键节点评价方法。定义网络的关键节点即聚合度较大的节点^[20]。

在网络图 $G(N, E)$ 中,用 A_i 表示节点 n_i 的一跳邻节点集,节点 n_i 的聚合度定义为子图的度数与子图节点总数的比值,用公式表示为^[20]:

$$P_i = \frac{|l = (i, j) \in E | i, j \in A_i \cup \{n_i\}|}{|A_i| + 1} \quad (1)$$

该值是子图 G' (节点 n_i 及其一跳邻接点组成的子图)的度与节点总数的比值,表示子图 G' 中节点间联系的密切程度。其中, l 表示节点 n_i 与其一跳邻节点集 A_i 所组成的并集中所有节点之间存在的链路,则 $|l = (i, j) \in E | i, j \in A_i \cup \{n_i\}|$ 表示这些链路的数目。定义 P_i 越大,节点 n_i 在网络中所占的分量越重。这样就可以对节点 n_i 的重要性进行评价并判断节点 n_i 是否为关键节点。

综合前文分析,可以得出以下结论。

(1)星间链路整网抗干扰性能受单星抗干扰性能影响:单星抗干扰性能越好,整网抗干扰性能就越好;单星抗干扰性能越差,整网抗干扰性能也就越差。

(2)星间链路整网抗干扰性能受星间建链策略的影响:星间建链策略决定星间通信拓扑结构;随着卫星运动和星座拓扑结构变化,整网性能也发生变化。

(3)星间链路整网抗干扰性能受失效卫星节点重要性的影响:部分关键卫星在网络中的重要性相对较高,在受干扰卫星数目相同的情况下,关键卫星受干扰会导致相对更大的整网性能下降。

2 抗干扰性能测试场景设计

星间链路整网抗干扰性能评估基本思想是设置各种干扰场景,反复测试系统功能、性能指标。因此,抗干扰性能评估的关键是进行干扰评估场景设计。

1) 干扰场景建模

根据战时对抗情况推演干扰场景。某个干扰场景 S 可表示为:

$$S(J_N, J_L, J_P, J_T, S_i, t, T_J) \quad (2)$$

式中,7个变量的含义分别如下:

- J_N : 干扰站数量(Jammer Number)
- J_L : 干扰站位置(每个干扰站在地球表面的地理坐标, Jammer Location)
- J_P : 干扰站功率(每个干扰站的 EIRP, Jammer Power)
- J_T : 干扰类型(每个干扰站发出干扰的类型, Jammer Type)
- S_i : 要干扰的卫星(干扰目标, Target Satellite)
- t : 干扰开始时间(Jamming Starting Time)
- T_J : 干扰持续时长(Jamming Lasting Time)

2) 变量说明

(1) J_N : 干扰站数量

取值范围:取决于干扰成本。通常情况下,干扰站数量不大于卫星数量。

每个干扰站在同一时间只能干扰一颗卫星。也可以多个干扰站对同一颗卫星实施干扰(分别覆盖不同弧度),则干扰站数目将更多。

(2) J_L : 干扰站位置(每个干扰站在地球表面的地理坐标)

取值范围:全球陆地。当干扰站接近星下点时,可以取得更好的干扰效果。在星间建链策略未知的情况下,干扰站接近星下点,可保证干扰进入星间天线的入射角度基本固定,从而进入星间天线的干扰功率较为稳定。

(3) J_P : 干扰站功率(每个干扰站的 EIRP)

干扰站 EIRP 越大,其对星间链路的性能影响也越大;严重情况下,大功率干扰可导致卫星失效。干扰站功率可在一定范围内分强弱多档。

对于不同的频段,可实现的最大干扰功率不同。以 Ka 频段为例,最大功放功率以 200kW 计算,天线口径以 20m 计算,则干扰站 EIRP 为 123.6dBW。干扰站功率可从 60dBW 到 123.6dBW 分强弱多档。

(4) J_T : 干扰类型(每个干扰站发出干扰的类型)

取值范围。压制干扰:宽带、窄带、脉冲、扫频;等欺骗干扰:转发式欺骗、产生式欺骗对于压制式干扰,主要控制参数如下:

单频干扰:功率、中心频率;

宽带干扰:功率、中心频率、带宽;

窄带干扰:功率、中心频率、带宽;

脉冲干扰:功率、脉冲周期、占空比、脉冲调制类型;

扫频干扰:功率、扫频范围、扫频速率。

(5) S_T :要干扰的卫星(干扰目标)

一天之内,一个干扰站可干扰的卫星是变化的,即其干扰目标是随着时间变化的。

由于发射功率较大,针对星间链路的干扰站一般是非移动式的。干扰站建立之后,只能对天顶可见卫星实施干扰,而被干扰卫星过境后,干扰将失效,此时干扰站的干扰目标更换为其他卫星。如果选择星座中关键节点卫星实施干扰,则可提升干扰效果。

(6) t :干扰开始时间

取值范围:任意时刻。

对于普通的通信网、雷达网,其拓扑结构是固定的,因此其测试场景设计可不考虑起始时间。但对于星间链路,星座拓扑随卫星运转而变化;根据具体的星间建链策略,星间链路网络拓扑也随时间变化。

(7) T_j :干扰持续时长

取值范围:1min ~ 永久。

干扰持续时长取决于干扰站的功率和干扰策略。由于散热等问题,大功率干扰机通常采取间歇性工作模式。对于MEO卫星星座,其星间拓扑结构变化存在固定周期。通常,干扰持续时长达到此固定周期即可实现较为完备的干扰模拟,特殊情况下也可根据实际测试需要,延长或缩短干扰持续时长。

上述任意一个变量取值的改变,都将形成一个新的干扰场景。通过干扰场景建模,可以实现对测试场景规模、数量的控制和优化。在实际评估过程中,可以根据评估对象的不同,评估的目的和侧重点(如测距或通信),在干扰模型中选取重点要素进行遍历,而其他要素取典型值即可。

3 星间链路整网抗干扰性能评估方法

3.1 星间链路平均可用率指标体系定义

星间链路网络结构随着星座运行而变化,其抗干扰性能与单星抗干扰性能、星间建链策略等多种因素有关。星间链路抗干扰性能评估场景涉及干扰站数量、干扰站位置、干扰站功率、干扰类型、要干扰的卫星、干扰开始时间、干扰持续时长等7种要素,场景设计非常复杂。

为对星间链路抗干扰性能进行准确、全面评价,首先定义了星间链路整网抗干扰性能评估指

标体系,然后提出了适用于复杂星间链路的整网抗干扰性能评估方法。

3.1.1 特定干扰场景下某链路时间平均可用率

某统计周期 T 内(如1h),实施干扰。若统计周期过短,则干扰实施过程中,存在某链路本来就不建链,谈不上受干扰影响性能降低的情况。因此,规定统计周期 T 大于建链最大间隔时间(以开始建链时间记)。

根据星间链路建链策略,无干扰情况下,某链路建链正常工作时间为 T_1 ,由于受到干扰,建链正常工作时间下降,变为 T_2 。

定义统计周期 T 内,节点卫星 n_i 到节点卫星 n_j 之间连通的平均可用率 $r_{ij} = T_2/T_1$ 。

对于星间链路卫星网络,单链路平均可用率 r_{ij} 表示了特定时段网络节点对之间建链的可用率,是一个概率指标。链路可用率 r 是一个概率指标($r \in [0, 1]$),其最大值为1(完全可用,全性能工作正常),最小值为0(对应两节点间完全无法正常建链)。

3.1.2 特定干扰场景下整网平均可用率

1) 特定干扰场景下链路时间平均可用率矩阵

特定场景下,统计时间 T 内,对于星间链路网络 $G(N, E)$ 在某一时间状态下的可用率,用可用率矩阵表示为:

$$\mathbf{R} = [r_{ij}]_{N \times N}^t \quad (3)$$

其中 r_{ij} 为时间 t 状态时节点卫星 n_i 到节点卫星 n_j 之间连通的平均可用率,与网络 $G(N, E)$ 的元素可靠性以及 $G(N, E)$ 的拓扑结构有关。对于星间链路网络(通信和测距), $G(N, E)$ 为一个无向图,则 \mathbf{R} 为对称矩阵。

2) 特定干扰场景下整网平均可用率

整网平均可用率即网络各个节点间链路的平均可用率。

定义星间链路网络 $G(N, E)$ 的平均可用率为所有节点对之间建链链路时间可用率的平均,如式(4)所示。

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{N-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N r_{ij} \right) \\ &= \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N r_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

3.1.3 遍历干扰场景下整网平均可用率

定义 M 种干扰测试场景,采用蒙特卡洛方法,对特定干扰场景下整网平均可用率执行蒙特卡洛测试。

遍历干扰场景下整网平均可用率即星间链路

整网平均可用率,定义为各场景下整网平均可用率的概率平均。

令 R 表示遍历干扰场景下整网平均可用率, R_m 表示第 m 种干扰场景下的整网平均可用率测试结果,则

$$R = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N R_m \quad (5)$$

3.2 星间链路平均可用率评估方法

采用上节提出的平均可用率指标体系,对星间链路整网抗干扰性能进行评估。星间链路整网抗干扰性能评估涉及多种干扰场景、多条链路(对应多颗卫星)、较长时间(星间网络拓扑根据建链策略随时间变化);星间链路整网抗干扰性能的准确评估需要遍历干扰场景、链路、运行时间3个维度,比天线阵抗干扰性能评估更为复杂(后者只需遍历干扰场景)。

为了满足星间链路抗干扰性能评估完备性要求,必须采用合适的方法实现对上述3个维度的完备建模和遍历性覆盖。本文采用由内向外、从单链路到整网的次序,依次实现运行时间、链路、干扰场景3个维度的遍历。

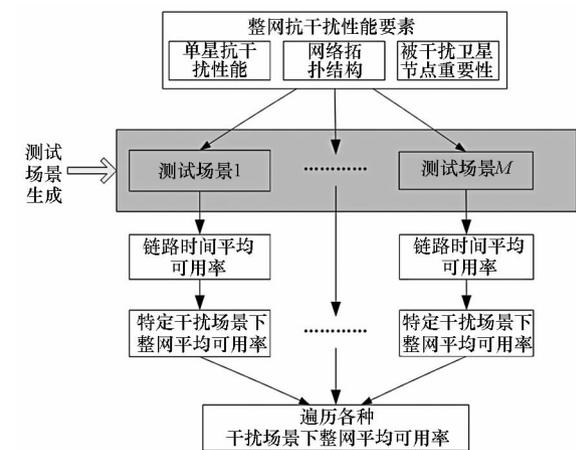


图2 星间链路整网抗干扰性能平均可用率评估方法

Fig. 2 Average availability evaluation method of anti-interference performance of the whole inter-satellite links network

星间链路可用率评估方法如图2所示,随机对 M 个测试场景进行蒙特卡洛测试,则得到 M 个特定场景下的整网平均可用率,进而对 M 个平均可用率再求均值。

星间链路可用率评估的主要步骤为:

1) 设置星间链路网络性能评估要素

网络平均要素包括:单星抗干扰性能、星间链路建链策略,卫星网络节点重要性等。

2) 设置和更换评估场景

干扰场景具体设置参数包括:一个或多个地面干扰源所处地面位置(经纬度坐标)、干扰源发射功率、干扰类型、目标卫星、干扰开始时间、干扰持续时长等。干扰场景设计依据第2节分析论证结果进行。

3) 测试特定干扰场景下链路时间平均可用率矩阵

首先根据3.1节链路时间平均可用率定义,测试得到干扰情况下各链路时间平均可用率,进而得到特定干扰场景下时间平均可用率矩阵。

4) 测试特定干扰场景下整网平均可用率

设定某种干扰测试场景,对该场景下星间链路整网平均可用率进行评估。

5) 测试遍历干扰场景下整网平均可用率

更换测试场景,对各种场景下星间链路整网平均可用率进行评估,进而得到遍历测试场景下的整网平均可用率。

4 结束语

本文针对卫星导航系统星间链路整网抗干扰性能评价困难的问题,分析了与整网抗干扰性能评估相关的要素,设计了整网抗干扰性能评估场景,定义了整网抗干扰性能评估指标体系,并提出了基于整网平均可用率的性能评估方法,可以用于卫星导航系统星间链路整网抗干扰性能的定量评估,对于不同星间链路抗干扰性能对比具有参考意义。星间链路的主要任务是通信(星间数传、上行数据/指令分发)和测距(高精度星间测距、自主定轨)。不同任务类型对干扰的容忍程度不同,通常星间通信对接收信号质量的要求高于测距,从而对干扰影响更为敏感。在根据本文提出方法对星间链路抗干扰性能进行评估时,需要针对不同任务需求,结合具体应用背景分别进行论证。

参考文献 (References)

[1] John A R. Highlights of GPS II-R autonomous navigation [C]//Proceedings of the 58th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 21st Guidance Test Symposium, Albuquerque, NM, 2002: 354 - 363.

[2] Francisco A F. Inter-satellite ranging and inter-satellite communication links for enhancing GNSS satellite broadcast navigation data[J]. Advances in Space Research, 2011, 47 (5): 786 - 801.

[3] 朱俊,廖瑛,文援兰. 基于星间测距和地面发射源的导航星座整网自主定轨[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2): 15 - 19.

ZHU Jun, LIAO Ying, WEN Yuanlan. The integrated autonomous orbit determination of the navigation constellation

- based on crosslink range and ground-based emitter[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(2): 15 - 19. (in Chinese)
- [4] Sanchez M, Pulido J A, Amarillo F, et al. The ESA GNSS + project inter-satellite ranging and communication links in the frame of the GNSS infrastructure evolutions[C]//Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, 2008: 2538 - 2546.
- [5] Yu Y, Chang Q, Yu Z J. One new measurement and communication techniques of GNSS inter-satellite links[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(1): 285 - 294.
- [6] Zhang T, Ren Z L, Sun C C, et al. An evaluation method of anti-jamming performance to receiver based on sample entropy [C]//Proceedings of 2010 International Conference on Information Networking and Automation (ICINA), 2010: 516 - 519.
- [7] Xie D G, Wu N, Wang C, et al. Anti-jamming performance simulation of tactical data link communication system[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 2012: 1056 - 1059.
- [8] 郭伟. 野战地域通信网可靠性的评价方法[J]. 电子学报, 2000, 28(1): 3 - 6.
GUO Wei. Reliability evaluating method of tactical communication network[J]. ACTA Electronica Sinica, 2000, 28(1): 3 - 6. (in Chinese)
- [9] 张学渊, 梁雄健. 关于通信网可靠性的研究方法[J]. 通信学报, 1997, 18(4): 54 - 57.
ZHANG Xueyuan, LIANG Xiongjian. The research method on telecommunication network reliability [J]. Journal of China Institute of Communications, 1997, 18(4): 54 - 57. (in Chinese)
- [10] 薛业飞. 通信网抗干扰性能的灰色聚类分析[J]. 通信对抗, 2006, 31(1): 19 - 21.
XUE Yefei. Antijamming performance analysis of communication network with grey cluster theory [J]. Communication Countermeasures, 2006, 31(1): 19 - 21. (in Chinese)
- [11] 杨志强, 张磊, 谢虹. 雷达网动态抗干扰性能评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(S1): 44 - 46.
YANG Zhiqiang, ZHANG Lei, XIE Hong. Model of evaluating the dynamic anti-jamming ability of radar net [J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(S1): 44 - 46. (in Chinese)
- [12] 杨志强, 谢虹. 基于信息原理的雷达网抗干扰性能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(1): 34 - 35.
YANG Zhiqiang, XIE Hong. Evaluation of the anti-jamming ability of radar net based on the principle of information[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(1): 34 - 35. (in Chinese)
- [13] Fante R L. Principles of adaptive space-time-polarization cancellation of broadband interference [R]. MITRE Corporation, 2003.
- [14] Fante R L, Vaccaro J J. Evaluation of adaptive space-time-polarization cancellation of broadband interference [R]. MITRE Corporation, Bedford, MA, 2003.
- [15] Fante R L. Principles of adaptive space-time-polarization cancellation of broadband interference[C]. ION GNSS 2004, Long Beach, CA, 2004.
- [16] 王瑛. 卫星定位接收机空域抗干扰关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
WANG Ying. Study of the key technology of spatial anti-jamming for satellite positioning receiver [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [17] 王瑛, 刘小汇, 王飞雪. 基于可用率的自适应阵抗干扰性能评估[C]. 全国天线年会, 2007: 114 - 117.
WANG Ying, LIU Xiaohui, WANG Feixue. Availability ratio based evaluation of anti-jamming performance of adaptive arrays[C]//Proceedings of NCAnt2007, 2007: 114 - 117. (in Chinese)
- [18] 聂俊伟. GNSS 天线阵抗干扰算法及性能评估技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
NIE Junwei. Study on GNSS antenna arrays anti-jamming algorithm and performance evaluation key techniques [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] 聂俊伟, 葛锐, 李垣陵, 等. 基于导航定位服务性能的 GNSS 天线阵抗干扰统计性能评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2): 81 - 87.
NIE Junwei, GE Rui, LI Yuanlin, et al. Performance evaluation method for GNSS anti-jam antenna arrays based on the navigation service performance [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(2): 81 - 87. (in Chinese)
- [20] 杜胜永, 柴乔林, 王华. 基于节点聚合度的生成簇算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(4): 948 - 950.
DU Shengyong, CHAI Qiaolin, WANG Hua. Clustering algorithm based on convergence degree [J]. Computer Applications, 2006, 26(4): 948 - 950. (in Chinese)