

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.11.023

引用格式:赵春芬.采用 Simulink/Stateflow 的隐身数据链仿真及性能评估框架实现[J].电讯技术,2014,54(11):1580-1586. [ZHAO Chun-fen. Implementation of Simulation and Performance Evaluation for Stealth Data Link Using Simulink/Stateflow[J]. Telecommunication Engineering, 2014,54(11):1580-1586.]

采用 Simulink/Stateflow 的隐身数据链仿真及性能评估框架实现*

赵春芬**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:对数据链仿真现状进行了分析,以 Simulink/Stateflow 为仿真平台,搭建了隐身数据链仿真及性能评估框架。仿真结果表明,采用 Simulink/Stateflow 对隐身数据链系统建模、仿真、性能评估在技术上是可行的。研究内容对隐身数据链仿真和性能评估具有一定的参考价值。

关键词:隐身数据链;系统仿真;性能评估

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)11-1580-07

Implementation of Simulation and Performance Evaluation for Stealth Data Link Using Simulink/Stateflow

ZHAO Chun-fen

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Status of simulation of data link is analyzed. Simulation framework is established under Simulink/Stateflow environment in order to explore the environment of performance evaluation of stealth data link. The results prove that modeling, simulation and performance evaluation of stealth data link system under Simulink/Stateflow environment is feasible. The research in this paper has reference value for simulation and performance evaluation of stealth data link.

Key words: stealth data link; system simulation; performance evaluation

1 引言

射频隐身是未来先进战机隐身要求的重要方面,数据链系统是隐身平台主要辐射源传感器系统之一。满足隐身需求的数据链主要通过定向组网、功率控制、采用窄波束低副瓣天线、采用隐身波形几种技术途径来实现。对隐身数据链的隐身性能评估,精确的数据链系统组网协议和波形仿真都是非常必要的。传统数据链仿真可分为网络仿真和波形仿真,两类仿真一般都是分开独立进行的,仿真技术已经非常成熟。网络仿真一般采用诸如 OPNET、

QUALNET、NS2 等网络仿真软件来完成^[1-5],对系统的通信性能进行评估。数据链波形仿真一般基于 Matlab/Simulink/Systemview/SPW 进行,研究波形的抗干扰性能^[6-7]。网络仿真软件重点是对通信系统的协议进行建模并对网络性能进行评估,而通信系统物理层的抗干扰特性,例如信噪比和误码率对应关系,一般是通过写成数据表格的方式作为仿真系统的输入,网络仿真软件一般不提供波形处理算法函数,所以网络仿真软件不支持/不适合数据链系统波形级仿真。目前还没有一种比较成熟的仿真框架和仿真

* 收稿日期:2014-07-10;修回日期:2014-08-27 Received date:2014-07-10;Revised date:2014-08-27

** 通讯作者:34090553@qq.com Corresponding author:34090553@qq.com

环境同时支持数据链网络仿真和波形仿真,有必要探索并开发能够同时支持这两种仿真的平台,进行隐身数据链仿真以及通信性能、隐身性能评估。

本文以 Simulink/Stateflow 作为开发平台,搭建了典型隐身数据链网络仿真框架,为今后数据链网络仿真与波形仿真的结合、评估隐身数据链性能奠定基础并提供参考。

2 隐身数据链性能评估框架原理

本文主要解决的问题:探索在 Simulink/Stateflow 环境下进行隐身数据链网络仿真的可行性,即探索 Simulink/Stateflow 是否具有雷达、机动、组网协议、物理层、天线、无线信道、信号截获的建模、性能指标统计及显示能力。

外军典型的具有隐身特性的数据链包括机间数据链(IFDL)和多功能先进数据链(MADL)^[8]。IFDL和MADL均采用定向组网技术,实现网络参与平台之间的网络组建和互相通信。目前美军应用定向通信技术的系统除IFDL和MADL外,还包括协同作战能力(CEC)^[2]。本文提取典型隐身数据链系统的体制特点,搭建隐身数据链系统仿真及性能评估框架,如图1所示。

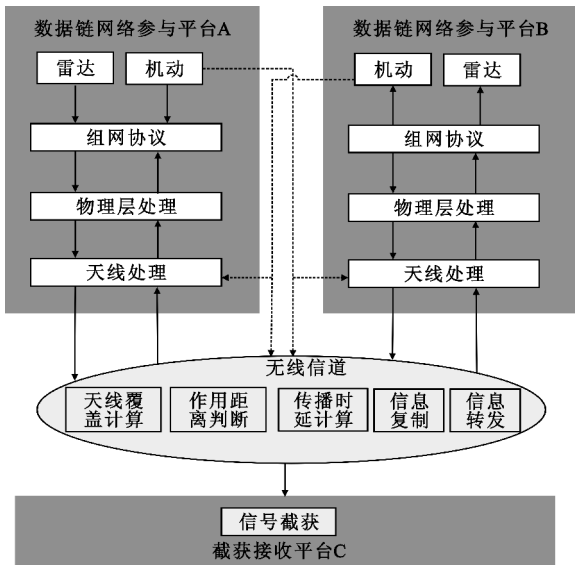


图 1 隐身数据链仿真框架
Fig. 1 Framework of stealth data link simulation

仿真框架包括如下模型:

- (1) 雷达:产生雷达探测信息;
- (2) 机动:产生平台位置信息;
- (3) 组网协议:实现数据链 TDMA 组网协议、信息处理、波束指向控制;

- (4) 物理层处理:实现信息传输和实际传输设备带来的信息延迟;
- (5) 天线处理:将数据链消息携带天线指向信息送至无线信道;
- (6) 无线信道:实现信号的无线传播延迟、复制、转发(至有效接收端);
- (7) 信号截获:输出截获信号的仿真时刻以及截获目标。

仿真统计的指标包括:

- (1) 数据链参与平台接入信道仿真时刻,考察组网协议实现情况;
- (2) 数据链消息流经源平台、无线信道、目的平台仿真时刻,考察仿真框架对信息处理逻辑顺序及时延是否正确;
- (3) 数据链消息端到端时延随仿真时刻变化关系,考察仿真框架对数据链典型通信性能统计能力;
- (4) 作战平台从无线信道收到/截获数据链消息(通信对端平台)/辐射信号(截获平台)的仿真时刻,考察无线信道模型的功能及仿真框架对隐身数据链的典型隐身性能统计能力。

仿真框架的典型仿真应用场景如图 2 所示。

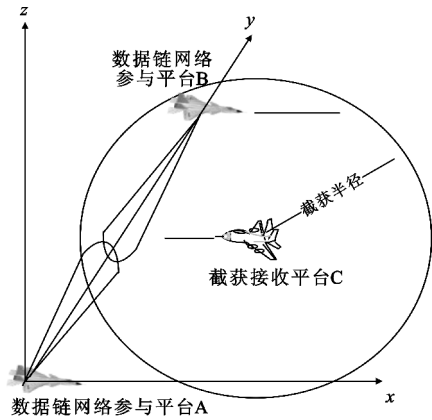


图 2 典型仿真应用场景
Fig. 2 Typical scenario of simulation application

3 仿真实现

模型建模采用 Stateflow 完成,仿真框架采用 Simulink 搭建。仿真框架中的雷达模型、机动模型、物理层处理模型、天线处理模型、截获平台中的信号截获模型的实现相对简单。组网协议模型、无线信道模型是本文建模的关键技术,下面分别介绍。

3.1 组网协议模型

如图 1 所示,组网协议模型与机动模型、雷达模型、物理层模型有信息铰链关系,具体为:接收机动

模型、雷达模型产生的信息;接收来自物理层的数据链消息;向物理层模型发送数据链消息。图 3 为组网协议模型外部接口图,表 1 为组网协议模型的外部接口描述,其中模型接口的事件类型数据均为双边沿,即上升沿和下降沿均代表事件到达。

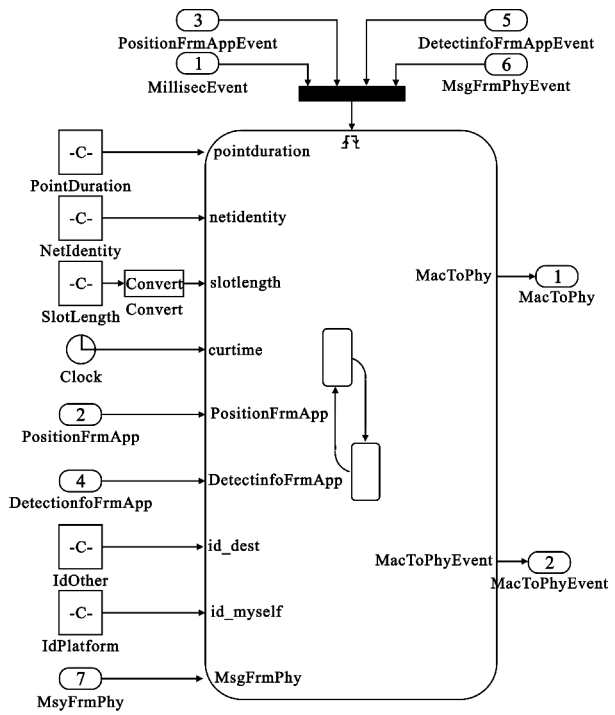


图 3 组网协议模型外部接口

Fig. 3 External interface of network protocol model

表 1 组网协议模型外部接口描述

Table 1 External interface of network protocol model

类型	接口名称	描述
输入	MillisecEvent	毫秒脉冲事件,组网协议根据配置的时隙大小,确定相邻两次接入信道的时间间隔,此事件用于触发下次接入信道。
	PositionFrmApp	本平台位置信息
	PositionFrmAppEvent	本平台位置信息到达事件
	DetectinfoFrmApp	本平台雷达探测信息
	DetectinfoFrmAppEvent	本平台雷达探测信息到达事件
	MsgFrmPhyEvent	来自物理层模型的信息到达事件
	MsgFrmPhy	来自物理层模型的信息
输出	MacToPhy	送至物理层模型的信息
	MacToPhyEvent	有信息送至物理层模型事件
	SumT	组网协议模型发送(即接入信道)次数
	SumR	组网协议模型接收信息(来自物理层的信息)次数
	DelayPosition	接收来自通信对端的平台位置信息端到端延迟
	DelayDetection	接收来自通信对端的雷达探测信息端到端延迟

表 2 为组网协议模型的配置参数。组网协议根据配置的天线对准时间,按照主从顺序有序地接入信道,占用信道的时间为配置的时隙大小。

表 2 组网协议模型配置参数

Table 2 Configuration of network protocol model

参数名	描述
对准时间/ms	模型在配置的对准时间延迟后,开始按照协议启动信道接入
网络身份(主、从)	主站首先启动接入信道,从站在时隙长度间隔后启动接入信道
时隙长度/ms	平台相邻两次接入信道的时间间隔为时隙长度
平台 ID	平台发送的信息头中携带平台的源地址和通信对端平台地址
对端平台 ID	平台发送的信息头中携带平台的源地址和通信对端平台地址

组网协议模型包括如下 4 个并行状态:

(1)接收本平台机动模型产生的位置信息。当“PositionFrmAppEvent”事件(如图 3 所示,当机动模型有新的位置信息产生时,向组网协议模型触发此事件)到达时,接收并保存平台位置信息;

(2)接收本平台雷达探测信息。当“DetectinfoFrmAppEvent”事件(如图 3 所示,当雷达模型有新的探测信息时,向组网协议模型触发此事件)到达时,接收并保存雷达探测信息;

(3)接收来自物理层的消息。当“MsgFrmPhyEvent”事件(如图 3 所示,当物理层模型收到新的数据链消息时,向组网协议模型触发此事件)到达时,接收并处理来自物理层模型的消息,计算并更新仿真统计数据;

(4)信道接入。数据链网络参与平台按照固定时隙分配方式接入信道;平台接入信道时,发送数据链消息(雷达探测信息和平台位置信息);此状态包括如下 4 个互斥子状态:

1)天线对准。仿真启动后,默认进入此状态,启动计时器;每当“MilliSecEvent”事件到达时,计数器增 1;当计数器值等于“天线对准时间”时,如果平台身份是主站,则进入“主站发送”状态,否则进入“从站第一次发送”状态;

2)主站发送。经历“天线对准”时间后,主站第一次启动发送,接入信道,每间隔 2 个时隙时间长度后,重新进入此状态,循环进行;

3)从站第一次发送。从站第一次启动发送与

主站第一次启动发送的时间间隔为一个时隙时间长度,并且主站发送在前、从站发送在后。发送处理完成后进入“从站发送”状态;

4)从站发送。在此状态下,从站启动发送;每隔 2 个时隙长度的时间间隔,重新进入此状态,循环进行。

3.2 无线信道模型

平台间交换的数据链消息在无线信道部分汇集并完成分发。无线信道模型完成如下功能:一是数据链通信平台间在满足通信距离和天线覆盖条件下的信息交换;二是数据链平台发射信号在满足截获距离及天线覆盖条件下被截获接收平台截获;三是信号在无线信道的传播延迟。表 3 和表 4 分别为无线信道模型外部接口、无线信道模型配置参数,其中模型接口的事件类型数据均为双边沿,即上升沿和下降沿均代表事件到达。

表 3 无线信道模型外部接口		
Table 3 External interface of wireless channel model		
类型	接口名称	描述
输入	MillisecEvent	毫秒脉冲事件,用于实现无线信道传播延迟功能时间计数
	MsgFrmPlatformA	来自平台 A 的消息
	MsgFrmAEvent	收到来自平台 A 的消息事件
	positionA	平台 A 的位置信息
	PositionB	平台 B 的位置信息
	MsgFrmPlatformB	来自平台 B 的消息
输出	MsgFrmBEvent	收到来自平台 B 的消息事件
	AReceiveEvent	平台 A 收到信息事件
	BReceiveEvent	平台 B 收到信息事件
	CReceiveEvent	平台 C 收到信息事件
	MsgToPlatformA	平台 A 收到的消息
	MsgToPlatformB	平台 B 收到的消息
	MsgToPlatformC	平台 C 收到的消息

表 4 无线信道模型配置参数	
Table 4 Configuration of wireless channel model	
参数名	描述
通信距离/m	数据链平台发送的信息是否被通信对端接收的一个判据
截获距离/m	数据链平台辐射的信号是否被截获接收平台截获的一个判据
平台 C 的位置 (x,y,z 坐标值)	平台 C 为信号截获接收载机平台,在本文中位置不变

无线信道模型包括如下 3 个互斥状态:

(1)空闲 (Idle) 状态:仿真初始默认进入此状态;当有平台 A 消息进入信道事件到达时,进入“MessageInFrmA”状态;当有平台 B 消息进入信道事件到达时,进入“MessageInFrmB”状态;模型跳出此状态时,计算平台 A、B、C 之间的距离以及之间的无线传播延迟,计算平台 C 与消息源平台的夹角 θ 。

(2)平台 A 消息进入信道 (MessageInFrmA) 状态,本状态包含 7 个互斥子状态。进入 7 个互斥状态用到的判据包括:①A、B 平台间的距离小于通信距离;②A、C 平台间的距离小于截获距离;③A、B 平台间的无线传播延迟小于 A、C 平台间的无线传播延迟;④A、B 平台间的无线传播延迟大于 AC 平台间的无线传播延迟;⑤平台 C 落入平台 A 的天线覆盖范围。从“MessageInFrmA”中的子状态超转移 (即跳出) 进入“Idle”状态,跳出时的操作:触发相应的平台接收信息事件以及为平台接收信息端口赋值,跳出的时间由平台间无线传播延迟决定。7 个互斥状态的进入条件大致描述如下:

1)如果条件①、②、⑤同时满足,则平台 B 接收、平台 C 截获;根据 AB、AC 间的无线传播延迟对比情况,分为 B 接收和 C 截获同时进行、B 先接收以及 C 后截获、C 先截获以及 B 后接收 3 种情况 (涉及其中的 5 个互斥状态);

2)如果条件①满足且②、⑤中的一条不满足,则平台 B 接收 (涉及其中的 1 个互斥状态);

3)如果条件①不满足且②、⑤中的一条不满足,则直接从“状态”返回“Idle”状态;

4)如果条件①不满足且②、⑤同时满足,则平台 C 截获 (涉及其中的 1 个互斥状态);

(3)平台 B 消息进入信道 (MessageInFrmB) 状态:处理流程与“MessageInFrmA”状态处理流程类似。

3.3 小结

由于篇幅有限,本节对两个重要模型的建模过程进行了介绍,展现了 Stateflow 建模技术在数据链网络建模仿真的应用过程。完成模型建模工作以后,需要对模型进行自测试,保证模型按照指定的逻辑解算。平台建模将图 1 中的模型进行装配、连线。本文对平台的运动模型进行了简化,平台进行匀速直线运动,实际上,飞机的飞行姿态及姿态变化率、飞行速度、天气情况对波束对准、通信的效果 (例如

误码率、丢包率) 都有影响。仿真框架对数据链天线扫描、波束对准过程进行了抽象和简化, 只实现了对准的效果(波束对准时间为配置参数, 经历波束对准时间后, 数据链通信平台间的天线始终保持对准)。无线信道模型实现了两个数据链参与平台、一个截获接收平台对抗场景下的消息/信号汇集分发功能。截获平台实现了对满足截获距离和天线覆盖的辐射信号的截获功能。

4 仿真运行及结果分析

仿真场景如图 2 所示, 模型配置参数值见表 5, 仿真时间为0.8 s。

表 5 模型配置参数值
Table 5 Configuration value of models

模型	配置参数	参数值	
		平台 A	平台 B
机动模型	初始位置[$x;y;z$]	[0;0;0]	[0;100 000;0]
	对准时间/ms	5	5
组网协议模型	网络身份(1-主,0-从)	1	0
	时隙长度/ms	2	2
	平台 ID	11	22
天线模型	对端平台 ID	22	11
	天线宽度/(°)	20	20
无线信道模型	通信距离/m	200 000	
	截获距离/m	500 000	
	平台 C 的位置(x,y,z 坐标值)	[0;50 000;0]	

图 4(a) 是平台 A、B 的组网协议模型输出“MacToPhyEvent”随仿真时刻变化关系。图中, 平台 A 接入信道的时间分别是0.005 s(上升沿)、0.009 s(下降沿)、0.013 s(上升沿)、0.017 s(下降沿)、0.021 s(上升沿)、0.025 s(下降沿)……平台 B 接入信道的时间分别是0.007 s(上升沿)、0.011 s(下降沿)、0.015 s(上升沿)、0.019 s(下降沿)、0.023 s(上升沿)、0.027 s(下降沿)……组网协议模型实现了在经历天线对准时间(5 ms)后, 按照网络身份(主站首先接入信道, 一个时隙长度后从站接入信道)以及按照时隙长度有规律(同一个平台相邻两次接入信道的时间间隔为时隙长度的 2 倍)

地接入信道, 可见组网协议模型实现了既定的组网协议。

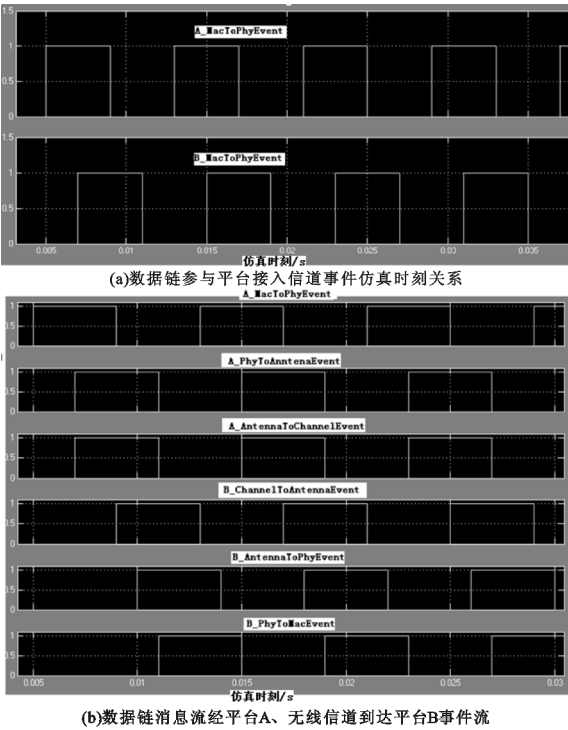


图 4 协议及仿真框架验证仿真结果
Fig.4 Simulation result for validating protocol and framework

图 4(b) 为源自平台 A 的数据链消息先后流经平台 A、无线信道到达平台 B 的事件过程:

- (1) 信息从发端平台 A 的组网协议模型发出送至物理层模型, 同时触发 MacToPhyEvent 事件, 如图中上数第一个图。平台 A 第一次启动信息发送(组网协议模型启动发送)的时间为0.005 s。
- (2) 信息在平台 A 的物理层模型内部处理后, 从物理层模型发出送至天线模型, 同时触发 PhyToAntennaEvent 事件, 如图中上数第 2 个图。在物理层中停留 2 ms(建模时将这个停留时间做成固定的时间开销, 为 2 ms);
- (3) 信息在平台 A 的天线模型内部处理后, 从天线模型发出送至无线信道模型, 同时触发 MsgFrmAEvent (为了易于理解, 上图中标识为 AntennaToChannelEvent) 事件(告知无线信道模型有信息进入无线信道), 如图中上数第 3 个图。信息在 0.007 s 时到达天线模型, 在天线模型内没有延迟, 将信息添加相应报头后直接送入无线信道模型;
- (4) 信息在无线信道模型内部处理完成后, 平台 B 接收条件成立的情况下, 信息从无线信道模型

流入平台 B 的天线模型,同时触发 ChannelToAntennaEvent 事件(告知天线模型有信息从无线信道流入),如图中上数第 4 个图。在无线信道停留的时间为 2 ms,这是由于:平台 A、B 间的距离始终为 100 km,无线传播延迟 0.33 ms,在模型实现时,将传播延迟向上取整即 1 ms;无线信道模型中,状态本身要占用一个最小时间单位 1 ms;

(5)信息在平台 B 的天线模型内部处理后,从天线模型发出送至物理层模型,触发 AntennaToPhyEvent 事件,如图中上数第 5 个图。信息从平台 B 的天线模型至物理层模型,延迟为 1 ms,这是由于仿真系统框架中,无线信道模型与天线模型之间增加了一个单位延迟(解决 Simulink 中的代数环问题);

(6)信息在平台 B 的物理层模型内部处理完成后,从物理层模型发出送至组网协议模型,触发 PhyToMacEvent 事件,如图中上数第 6 个图。信息从平台 B 的物理层模型至组网协议模型,延迟为 1 ms(解决 simulink 中的代数环问题);

(7)至此,平台 B 的组网协议模型收到来自平台 A 的数据链消息。

可见,事件顺序正确无误且事件间隔符合既定时延。

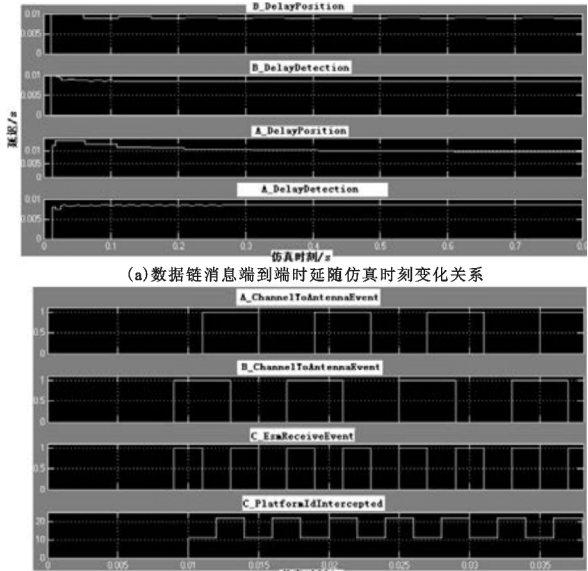
图 5(a)为 2 个平台接收的数据链消息端到端时延随仿真时刻变化关系,消息的端到端延迟大约在 8 ms,解释如下:

(1)其中 6 ms 为图 4(b)分析的延迟,即从信息在源端的组网协议模型启动发送到对端组网协议模型接收到信息的延迟;

(2)另外信源产生的信息在组网协议模型中需要等待约一半的接入信道间隔即 2 ms 才能启动发送,发送时延值验证了模型实现的正确性并且模型可以实现信息时延统计功能。

图 5(b)为作战平台收到来自无线信道的信号事件到达与仿真时刻关系,平台 B 的天线模型接收到信息的时间分别为 0.009 s、0.013 s、0.017 s、0.021 s、0.025 s……平台 A 的天线模型接收到信息的时间分别为 0.011 s、0.015 s、0.019 s、0.023 s、0.027 s……平台 C 截获信息的时间为 0.009 s、0.011 s、0.013 s、0.015 s、0.017 s、0.019 s、0.021 s、0.023 s、0.025 s……平台 C 每次截获的信息的源平台地址分别是 11、22、11、22、11……仿真

场景中,平台 C 落入平台 A、B 的天线覆盖范围且 A 和 B 均在 C 的截获距离范围内。由于篇幅限制,本文未描写平台 C 不在 A、B 天线覆盖范围和距离较远时的场景仿真情况,但在无线信道模型自测试时已经对所有功能模块进行了激励和测试。无线信道模型实现了既定的信息复制、广播、传播时延等功能;平台 C 的截获模型对于来自平台 A、B 的辐射信号均实现了截获,实现了满足截获条件下辐射信号的截获。



(a)数据链消息端到端时延随仿真时刻变化关系

(b)作战平台收到来自无线信道的信号事件到达与仿真时刻关系

图 5 延迟及无线信道模型仿真结果
Fig. 5 Simulation result of delay and wireless channel

5 结束语

本文以 Simulink/Stateflow 为仿真平台,搭建了参数级的隐身数据链仿真及性能评估框架。仿真结果表明:仿真框架按照设计思路实现了期望的仿真功能,经过完善可以满足基本的隐身数据链性能评估需求;Simulink/Stateflow 可以完成数据链系统网络仿真工作。今后需要根据具体的仿真需求,修改完善仿真框架,对特定的隐身数据链系统进行性能评估。波形级隐身数据链系统性能评估和仿真效率是需要考虑和解决的一个关键问题。

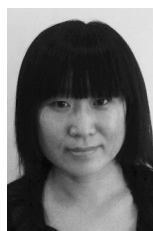
参考文献:

[1] 贾伟. 航空数据链关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
JIA Wei. Research on the Key Technology of Aviation Data

- Link[D]. Xi'an:Xidian University,2011. (in Chinese)
- [2] 贾铭. 数据链组网技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- JIA Ming. Research on Data Link Networking Technology [D]. Xi'an:Xidian University,2009. (in Chinese)
- [3] 孙利刚. 机间数据链设计与仿真[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
- SUN Li-gang. Design and Simulation of Inter-flight Data Link[D]. Xi'an:Xidian University,2010. (in Chinese)
- [4] 王安,吕娜,王湘,等. 基于 QualNet 的数据链仿真技术研究[J]. 计算机工程与技术,2012(9):276-280.
- WANG An,LV Na,WANG Xiang,et al. Research on data link simulation technology based on QualNet [J]. Computer Engineering and Design, 2012 (9) : 276 - 280. (in Chinese)
- [5] 黄永兢,王玉文,黄超,等. 基于 QualNet 的无人机数据链时延仿真[J]. 电讯技术,2012,52(7):1210-1215.
- HUANG Yong-jing, WANG Yu-wen, HUANG Chao, et al. UAV Data Link Time Delay Simulation Based on Qual-Net[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52 (7) : 1210-1215. (in Chinese)
- [6] 谢大刚,吴楠,杨向松,等. 战术数据链抗干扰性能仿真技术[J]. 舰船科学技术,2011(2):83-85.

- XIE Da-gang, WU Nan, YANG Xiang-song, et al. Anti-jamming performance simulation of tactical data link system[J]. Ship Science and Technology,2011(2):83-85. (in Chinese)
- [7] 何献武,胥辉旗,程永茂. Link-16 数据链抗干扰能力分析[J]. 舰船电子工程,2011(5):23-24.
- HE Xian-wu, XU Hui-qi, CHENG Yong-mao. Anti-interference Ability of Link-16 Data Link[J]. Ship Electronic Engineering,2011(5):23-24. (in Chinese)
- [8] 卢建川. 机载协同数据链系统现状与未来[J]. 国际航空杂志,2010(7):40-42.
- LU Jian-chuan. Status and Future of U. S. Military Multi-aircraft Cooperative Data Link[J]. International Aviation, 2010(7):40-42. (in Chinese)

作者简介:



赵春芬(1977—),女,辽宁绥中人,工程师,主要研究方向为系统仿真。

ZHAO Chun-fen was born in Suizhong, Liaoning Province, in 1977. She is now an engineer. Her research concerns system simulation.

Email:34090553@ qq. com