

本文引用格式: 周建红,张海,彭剑.LTE 小区搜索 PCI 验证方法研究与实现[J].自动化与信息工程,2022,43(6):13-19.

ZHOU Jianhong, ZHANG Hai, PENG Jian. Research and implementation of PCI verification method for LTE cell search[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(6):13-19.

LTE 小区搜索 PCI 验证方法研究与实现

周建红 张海 彭剑

(杰创智能科技股份有限公司, 广东 广州 510535)

摘要: 在长期演进 (LTE) 无线通信系统中, 用户终端与基站建立无线通信链路的前提是进行小区搜索, 以获取物理小区标识 (PCI)。首先, 介绍小区搜索系统的组成与信号处理流程, 并提出一种 PCI 验证方法; 然后, 给出 PCI 验证方法的现场可编程门阵列实现方案, 并采用 Verilog HDL 硬件描述语言实现; 最后, 进行电路仿真实验。实验结果表明, 该方法设计合理, 能够过滤虚假 PCI, 保证小区搜索系统的可靠性。

关键词: 小区搜索; 长期演进; 物理小区标识; 现场可编程门阵列

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)06-0003-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.06.003

Research and Implementation of PCI Verification Method for LTE Cell Search

ZHOU Jianhong ZHANG Hai PENG Jian

(Nexwise Intelligence Co., Ltd., Guangzhou 510535, China)

Abstract: In the long term evolution (LTE) wireless communication system, the precondition for the user terminal to establish a wireless communication link with the base station is to conduct cell search to obtain the physical cell identifier (PCI). Firstly, the composition and signal processing flow of the cell search system are introduced, and a PCI verification method is proposed; Then, the field programmable gate array implementation scheme of PCI verification method is given and implemented by Verilog HDL hardware description language; Finally, the circuit simulation experiment is carried out. The experimental results show that the design of this method is reasonable, and it can filter false PCI and ensure the reliability of the cell search system.

Keywords: cell search; long term evolution (LTE); physical cell identity (PCI); field programmable gate array (FPGA)

0 引言

物理小区标识 (physical cell identity, PCI) 是在小区搜索过程中, 用户终端 (user equipment, UE) 区分不同小区的无线信号^[1]。在长期演进 (long term evolution, LTE) 无线通信系统中, 当 UE 初次进入一个小区, 需要通过监听基站下行发送的实时信息来确定 PCI, 且 UE 接收的多个小区无线信号中, 不能有相同的 PCI, 否则会形成干扰。在实际应用中, UE 在某一时刻会接收到多个小区不同的 PCI, 但并不是每个 PCI 都是真实有效的。如果存在虚假 PCI, 将导

致 UE 系统译码与解调失败, 降低系统的可靠性与效率。因此, 在小区搜索过程中, 如何验证 PCI 的有效性是一个重要问题。

1 小区搜索系统

UE 开机、脱网或切换过程中都需要进行小区搜索。小区搜索关系到 UE 能否快速、准确地接入 LTE 无线通信系统。UE 通过小区搜索获取与基站同步的时间与频率, 识别目标 PCI^[2]。

1.1 系统组成

小区搜索系统主要由配置管理子系统、射频子系

统、PCI 搜索子系统、PCI 验证子系统等组成，示意图如图 1 所示。

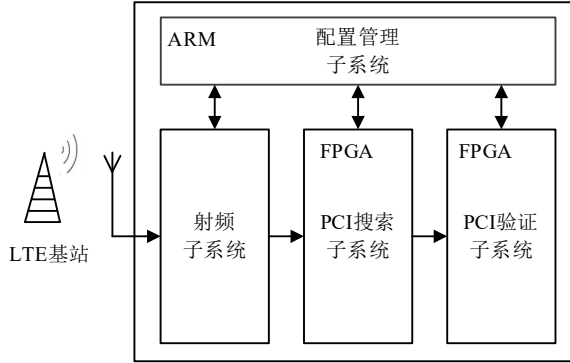


图 1 小区搜索系统组成示意图

配置管理子系统作为控制中心，管理与控制整个小区搜索系统。

射频子系统主要完成射频前端模拟信号的处理。

PCI 搜索子系统：首先，检测主同步信号(primary synchronization signal, PSS)，确定组内 ID、半帧定时信息、整数倍与小数倍频偏估计；然后，对接收符号的时域信号进行频偏校正与快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)；最后，在已知半帧定时信息的基础上，检测辅同步信号(secondary synchronization signal, SSS)，确定小区组 ID 与帧定时信息，获取 LTE 基站下行无线帧的起始位置，并根据组内 ID 与小区组 ID 计算小区 PCI 值^[3-6]。

PCI 验证子系统：首先，在获得帧定时位置与小区 PCI 值的基础上，提取子帧 0 的符号 0/4/7/11 的小区特定参考信号(cell-specific reference signal, CRS)并进行估计；然后，对估计后的 CRS 与本地的 CRS 进行相关累加求和运算；最后，与预先设定的门限进行比较，判断 PCI 的有效性。

1.2 信号处理

小区搜索系统信号处理分为模拟部分与数字部分，示意图如图 2 所示。模拟部分的天线接收空口射频信号经射频前端处理，通过 A/D 采样转变成同向正交(in-phase quadrature, IQ) 数字信号。

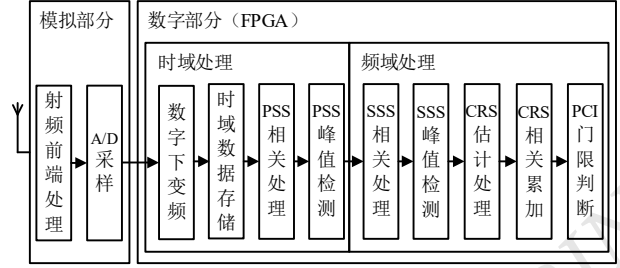


图 2 小区搜索系统信号处理示意图

数字部分利用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现，分为时域与频域信号处理。

时域信号处理：

1) A/D 采样后的 IQ 数字信号经过数字下变频后，变成采样率为 1.92 M 的基带信号，将基带时域信号存储在 FPGA 内部的 RAM 中；

2) 通过 PSS 相关处理(PSS 相关运算、整数倍与小数倍频偏估计)与 PSS 峰值检测排序，确定组内 ID(NID2)与半帧定时信息。

频域信号处理：

1) 从 RAM 中提取 SSS 数据进行相关处理(SSS 数据提取、频偏校正、去 CP、FFT)与 SSS 峰值检测排序，确定小区组 ID(NID1)与帧定时信息；

2) 由 NID1 与 NID2 计算得到 PCI 值，即 $PCI = 3 \times NID1 + NID2$ ；

3) 基于帧定时信息与 PCI 值，从 RAM 提取子帧 0 的符号 0/4/7/11 的 CRS 进行估计(CRS 提取、频偏校正、去 CP、FFT)与相关累加求和运算；

4) 将累加和的模值和与门限进行比较，判断 PCI 的有效性。

2 PCI 验证方法

下行参考信号已预先定义，并占用时频资源网格中某些特定的资源元素(resource element, RE)。LTE 定义了多种下行参考信号，每种参考信号都有不同的应用场景。其中，CRS 对小区内所有的 RE 有效，可用于下行物理信道的信道估计^[7-9]。由于小区搜索阶段无法得知具体的 CRS 端口数量，因此，在 PCI 验证

时, 仅利用端口 0 的 CRS 计算即可, 端口 0 的 CRS 位置分布如图 3 所示。

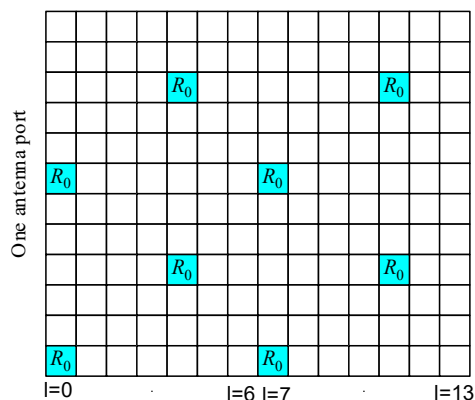


图3 端口 0 的 CRS 位置分布示意图

理论上, UE 得到小区的帧定时与 PCI 值后, 即可确定子帧 0 所在的位置, 进而确定每个时隙与符号所在的位置。由于 CRS 时频位置与 PCI 值是一一对应的, 在确定 PCI 值后, 终端可以确定该小区的 CRS 序列及时频位置^[10]。因此, 基于 CRS 序列特点, 通过对接收符号的 CRS 进行估计, 并将估计后的 CRS 与本地 CRS 相关累加求和, 再与预先设定的门限进行比较, 超过门限则输出该 PCI 值作为真实的 PCI 值, 不超过门限, 则丢弃该 PCI 值, 达到 PCI 验证的目的。PCI 验证方法示意图如图 4 所示。

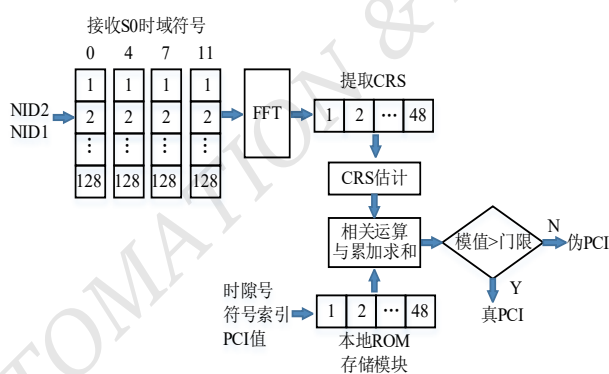


图4 PCI 验证方法示意图

由时隙号、符号索引、PCI 值生成本地端口 0 的参考信号;

1) 根据 PSS 与 SSS 的位置计算帧起始位置(子

帧 0 位置), 提取子帧 0 的第 0/4/7/11 时域 OFDM 符号, 经 FFT (频偏校正、去 CP) 至频域, 接收 CRS 并进行估计运算;

2) 将估计后的 CRS 与本地端口 0 的参考信号进行相关累加求和运算, 得到累加和的模值, 若模值大于门限, 则认为该 PCI 值为真, 若模值小于门限, 则认为该 PCI 值为假。

3 FPGA 实现

3.1 实现流程

基于 FPGA 的 PCI 验证方法实现流程图如图 5 所示。

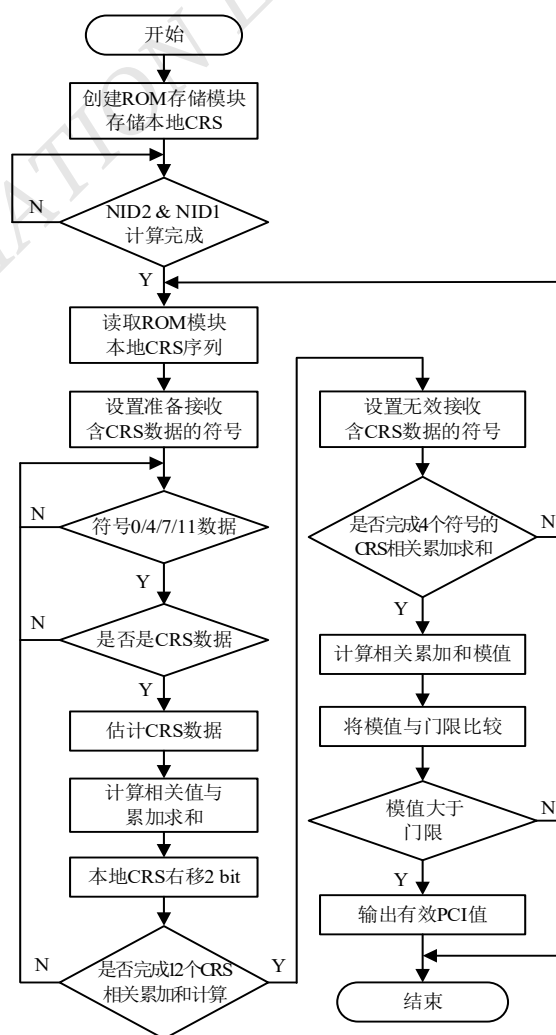


图5 基于 FPGA 的 PCI 验证方法实现流程图

1) 创建本地 ROM 存储模块, 存储本地 CRS。ROM 的初始化数据为提前计算好的本地 CRS 频域数据, 每个 CRS 用 2 bit 表示。由于每个符号最多包含 12 个 CRS 数据, 因此, 一个符号的 CRS 为 24 bit, 即每次读取本地 ROM, 可读取一个符号的 24 bit 本地 CRS_ROM 数据;

2) 初始化相关累加和寄存器的 SUM 值为 0, 等待 PSS 与 SSS 峰值检测模块输出的 NID2(组内 ID) 与 NID1(小区组 ID) 数据到达;

3) 根据帧定时信息及 NID2 与 NID1 的值, 读取 ROM 存储模块的符号 0/4/7/11 的 24 bit 本地 CRS 数据;

4) 将 FFT 模块的输入 ready 信号置高, 等待含 CRS 的接收符号 0/4/7/11 时域数据到来, 对数据进行频偏校正、去 CP 与 FFT, 即将数据从时域变换到频域;

5) 判断 FFT 后的每一个 IQ 频域数据是否为 NID2 与 NID1 组成的 PCI 对应的 CRS 数据, 判断条件为: $(V + V_{\text{shift}}) \% 6$ 是否等于 $(X \% 6)$, 其中: V 与符号索引有关, 符号 0/4/7/11 对应的 V 值分别为 0/3/0/3; $V_{\text{shift}} = \text{PCI} \% 6$; X 为接收符号频域数据的索引号, 取值范围为 0~71;

6) 对接收的 CRS 进行估计, 并将估计后的 CRS 与本地 CRS 进行相关累加和运算;

7) 将 CRS_ROM 右移 2 bit, 判断是否完成 1 个符号中所有 12 个 CRS 数据的计算, 如果没有, 则转到第 5) 步;

8) 判断是否完成 4 个符号数据的计算, 如果没有, 则转到第 4) 步, 读取下一个符号数据;

9) 计算相关累加和的模值;

10) 将相关累加和的模值与门限进行比较, 若超过门限, 则输出有效的 PCI 值, 否则判断为无效的 PCI 值。

3.2 逻辑设计

逻辑设计方案如图 6 所示。信号处理流程如下: 首先, 根据帧定时信息从 FPGA 内部的 RAM 中提取

子帧 0 的符号 0/4/7/11 的时域数据发送给频偏校正模块, 并将频偏校正后的时域数据的循环前缀 (cyclic prefix, CP) 去除; 然后, 进行 FFT, 即将去 CP 后的时域数据变换到频域, 根据符号索引与 PCI 值提取接收的 CRS 与本地 CRS, 并进行估计与相关运算; 接着, 将相关值进行累加求和, 完成符号 0/4/7/11 的 CRS 相关与累加运算; 最后, 计算累加和的模值, 并与设定的门限进行比较, 输出有效的 PCI 值。

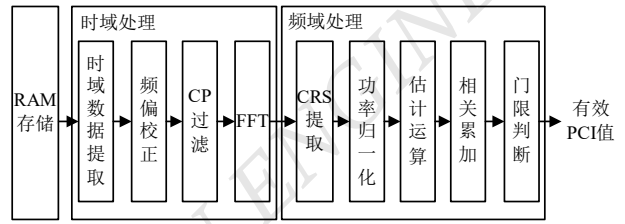


图 6 逻辑设计方案框图

3.3 实现电路

采用 Verilog HDL 语言描述 PCI 的验证方法, 并用 FPGA 专业软件综合代码得到具体的实现电路。图 7、图 8、图 9 分别为整体设计、时域处理与频域处理的 RTL 电路图。

3.4 PCI 预设门限

由 PCI 的验证方法可知, 通过估计后的接收 CRS 与本地 CRS 相关累加求和与预设门限进行比较, 判断 PCI 值是否有效。根据 LTE 协议, 本地 CRS 的计算公式为

$$L_{\text{crs}} = \pm\sqrt{2}/2 \pm j \times \sqrt{2}/2 \quad (1)$$

为便于存储, 本地 CRS 用 2 bit 表示为

$$\text{"1"} \text{ 表示 } -\sqrt{2}/2, \text{ "0"} \text{ 表示 } +\sqrt{2}/2$$

估计后的接收 CRS 是功率归一化后的值, 计算公式为

$$R_{\text{crs}} = \pm \cos \theta \pm j \times \sin \theta \quad (2)$$

在 FPGA 实现时, 本地与接收的 CRS 值量化为 10 bit, 且符号 0/4/7/11 共有 48 个 CRS 参与运算, 因此, PCI 预设门限计算公式为

$$PCI_{thld} = \text{abs}(48 \times (2^{10} \times Lcrs) \times (2^{10} \times Rcrs) / 2^{10})$$

(3)

$$(PCI_{thld})_{\max} = 48 \times 2^{10} \times \sqrt{2} / 2 = 34\ 750$$

在工程应用上, 对上述理论最大值取平均, 得到

将本地 CRS 与接收的 CRS 计算公式代入公式(3),

最终的 PCI 预设门限, 即

可得到 PCI 预设门限的理论最大值为

$$(PCI_{thld})_{\text{avg}} = 50\% \times 34\ 750 = 17\ 375$$

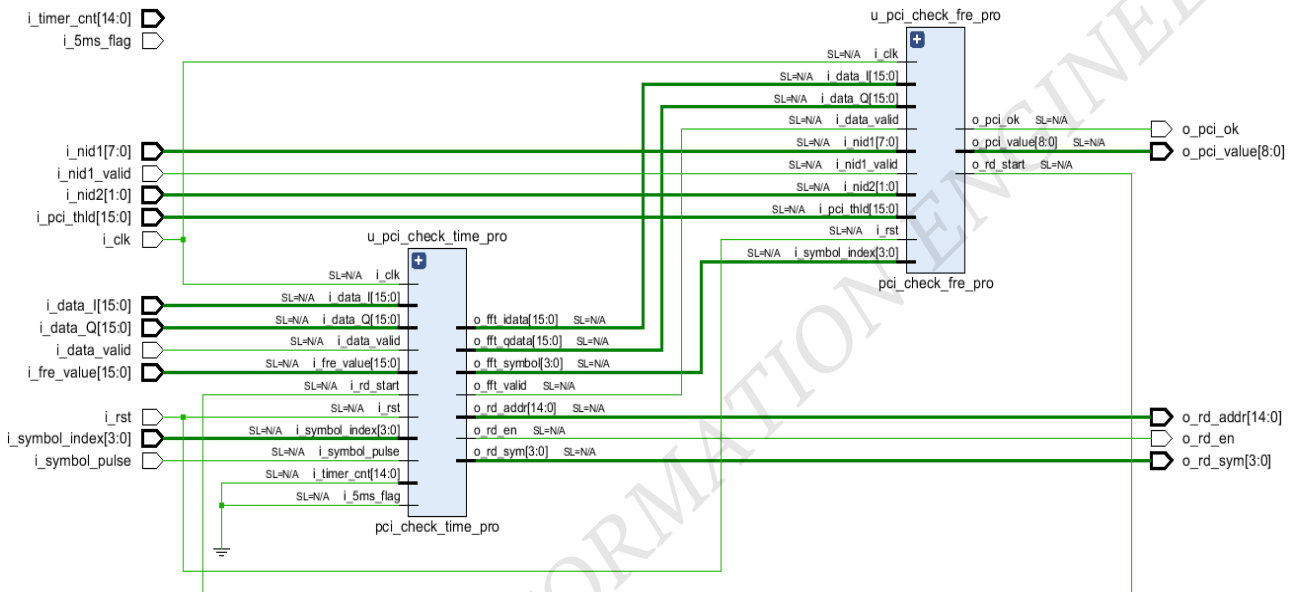


图7 整体设计 RTL 电路图

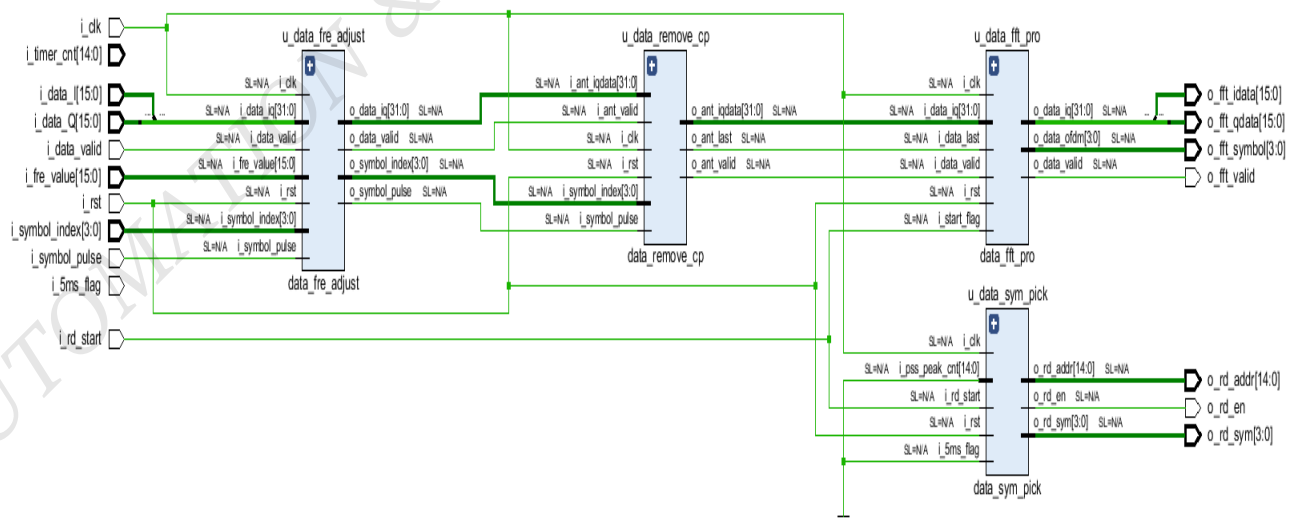


图8 时域处理 RTL 电路图

参考文献

- [1] 元泉.LTE 轻松进阶[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [2] 安德烈·佩雷斯.LTE 与 LTE-A:4G 网络无线接口技术[M].李争平,黄明,译.北京:机械工业出版社,2020.
- [3] 刘轩. TD-LTE 小区搜索的设计与实现[D].重庆:重庆邮电大学,2017.
- [4] 欧阳盛,吴烨宇.TD-LTE 系统小区搜索定时同步研究与实现[J].信息通信,2014,38(6):177-178.
- [5] 周玉梅,蒲俊,李桥龙,等.联合小区搜索与波束形成的干扰抑制方法[J].信息工程大学学报,2022,23(3):264-270;301.
- [6] 白兴金.TD-LTE 小区搜索和下行同步技术的研究及实现[D].成都:电子科技大学,2017.
- [7] 李晓辉,王先文,樊韬,等.基于卷积神经网络的高性能 5G 下行同步算法[J].北京邮电大学学报,2022,45(2):117-123.
- [8] Tara Ali-Yahiya.深入理解 LTE 及其性能[M].吴少川,梅林,叶亮,等,译.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.
- [9] 姚凯. LTE 物理层研究和实现[D].北京:北京邮电大学,2018.
- [10] 蒋青,卢伟,江宇航,等.多通道并行 TD-LTE 小区搜索架构设计与 FPGA 实现[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2017,29(4):433-440.

作者简介:

周建红,男,1983年生,硕士,工程师,主要研究方向:无线通信技术,数字电路设计。E-mail:zhoujianhong1001@126.com

张海,男,1983年生,硕士,工程师,主要研究方向:无线通信技术,数字电路设计。

彭剑,男,1979年生,硕士,工程师,主要研究方向:无线通信技术,数字电路设计。

~~~~~

(上接第 12 页)

## 参考文献

- [1] 李斌.基于边云协同技术的高速铁路“工电供”综合运维一体化管理平台研究与探索[J].电信科学,2019,35(S2):77-83.
- [2] 边缘计算与云计算协同白皮书(2018年)[R/OL].边缘计算产业联盟(ECC)、工业互联网产业联盟(AII)联合发布,(2018-11-20)[2022-12-01]<http://www.econsortium.net/Lists/show/id/335.html>
- [3] 中国信息通信研究院、云计算开源产业联盟.《云计算与边缘计算协同九大应用场景(2019年)》白皮书[R/OL].(2018-07-28)[2022-12-01].<https://max.book118.com/html/2019/0712/6242055200002044.shtm>.
- [4] 中国信息通信研究院、云边协同产业方阵、云计算开源产业联盟.云边协同关键技术态势研究报告[R/OL].(2021-07-28)[2022-12-01].<http://www.econsortium.org/Lists/show/id/653.html>.
- [5] 廖龙文,谢丰宇,陈军燕,等.美军“作战云”应用分析[J].军事文摘,2020(7):55-58.
- [6] 柯善学.美军网络安全(六):备受关注的云安全[EB/OL].(2019-9-22)[2022-12-01].<https://www.secrss.com/articles/13871>.
- [7] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi- UAV system[C]//American Control Conference(ACC), 2014. Portland, OR, USA: IEEE, 2014: 2077-2082.
- [8] LIU X Y, SUN J, DOU L H, et al. Leader-following consensus for discrete-time multi-agent systems with parameter uncertainties based on the event-triggered strategy[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2017,30(1):30-45.
- [9] 郭俊杰.外军宽频多模战术无线电发展现状浅析[J].移动通信,2016,40(20):70-76.

## 作者简介:

葛金鹏,男,1980年生,硕士,工程师,主要研究方向:无人系统、无线通信、信息技术等领域。E-mail:jpeng\_ge@163.com