

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.03.019

面向低空高密度 UAT2 模式 ADS-B 接收设备监视容量评估

汤新民^{1,2}, 冯文源¹, 管祥民³

(1. 中国民航大学天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室, 天津 300300; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 3. 中国民航管理干部学院民航通用航空运行重点实验室, 北京 100102)

摘要: 针对未来通用访问收发机(Universal access transceiver, UAT2)模式的广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)系统设备在低空高密度情景下对低空飞行器的监视工作可能产生报文重叠的问题, 将泊松过程和二项分布等概率公式与 UAT2 数据链路收发过程特点结合, 建立 ADS-B 接收设备处理单条报文接收成功率与影响变量的关系模型, 揭示了在理想工作情况下和报文重叠的情况下, ADS-B 接收设备的监视容量由信道误码率和处理速率共同决定。仿真结果表明: 以报文接收成功率 P_{SUC} 不低于 70% 为期望值, 信道误码率为 10^{-2} 时, 监视容量可达到 199 条/s, 误码率为 10^{-3} 时, 监视容量可达到 256 条/s, 仿真实验结果与模型曲线基本拟合验证了本文所提的 UAT2 数据链路 ADS-B 接收设备的监视容量量化评估模型的合理性。

关键词: 城市空中交通; 广播式自动相关监视; 通用访问收发机 2; 监视容量; 泊松过程

中图分类号: U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)03-0572-08

Assessment of Surveillance Capacity for Low Airspace and High Density Oriented UAT2 Mode ADS-B Receiver Equipment

TANG Xinmin^{1,2}, FENG Wenyuan¹, GUAN Xiangmin³

(1. Key Laboratory of Urban Air Mobility System Technology and Equipment of Tianjin, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. Key Laboratory of Civil Aviation General Aviation Operation and Civil Aviation, Management Institute of China, Beijing 100102, China)

Abstract: Since future universal access transceiver 2 (UAT2) mode automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) devices for low-altitude aircraft surveillance would face overlapping messages in high-traffic scenarios, this study combines probabilistic algorithms such as Poisson process and the binomial distribution with the features of the UAT2 data link transmission and reception process to tackle this potential issue. A relationship model is established to quantify the relations between the success rate of ADS-B receiving equipment receiving a single message and various influencing factors. This model reveals that the surveillance capacity of the ADS-B receiving equipment is jointly determined by the channel bit error rate and the sampling rate under both ideal operational conditions and conditions involving message overlapping. Simulation results indicate that when the minimum message reception success rate of 70% is set as the goal, the surveillance capacity can reach 199 s^{-1} with a channel bit error rate of 10^{-2} , and 256 s^{-1} with a bit error rate of 10^{-3} . The simulation results closely fit the model curves, validating the reasonableness of the proposed quantification assessment model for the surveillance capacity of UAT2 data link ADS-B receiving equipment.

Key words: urban air mobility; automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); universal access transceiver 2 (UAT2); surveillance capacity; Poisson process

基金项目: 国家自然科学基金(52072174); 天津市科技计划(24JCZDJC00090); 中国民航大学研究生科研创新项目(2023YJSKC08005)。

收稿日期: 2024-08-22; **修订日期:** 2025-03-20

通信作者: 汤新民, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xmtang@cauc.edu.cn。

引用格式: 汤新民, 冯文源, 管祥民. 面向低空高密度 UAT2 模式 ADS-B 接收设备监视容量评估[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(3): 572-579. TANG Xinmin, FENG Wenyuan, GUAN Xiangmin. Assessment of surveillance capacity for low airspace and high density oriented UAT2 mode ADS-B receiver equipment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(3): 572-579.

城市空中交通(Urban air mobility, UAM)为当前航空领域的热门话题^[1]。在未来UAM发展的过程中,大量中小型无人机及电动垂直起降飞行器(Electric vertical take-off and landing, eVTOL)将在短时间内涌入低空空域,亟需高效可靠的监视数据链对此类低空飞行器活动进行监视。如使用通用访问收发机(Universal access transceiver, UAT)模式的广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)系统作为UAM飞行器的监视链路与地面站进行双向通信,将会受到来自军机联合战术信息分配系统/多功能信息分发系统(Joint tactical information distribution system/multifunctional information distribution system, JTIDS/MIDS) Link 16数据链和测距仪(Distance measuring equipment, DME)测距机地面发射设备及数字电视信号的干扰^[2-3],这些干扰会降低UAT监视系统的性能,使低空空域情况变得复杂多变,增加了相关部门对低空空域的监管难度^[4]。NASA在《UAM的可靠安全通信导航监视方案》报告中,提出专用于UAM飞行器UAT2模式的ADS-B数据链^[5]。UAT2数据链与978 MHz UAT数据链的工作原理相同,增加了针对UAM飞行器进行可寻址数据上行链路通信,向其他UAM飞行器发送状态矢量的广播信息以及支持UAM运行的飞行器健康状况信息,可以更好地为UAM飞行器提供自动相关监视和飞行情报服务。同时,UAT2的工作频率为1 104 MHz,传输距离可达96 km,能够在低空空域高流量的情景下提供服务^[6-7]。如果未来使用UAT2模式ADS-B监视设备对UAM飞行器进行监视,需针对UAT2模式ADS-B接收设备的监视容量进行探究,以确保低空飞行作业活动在可控的范围内进行。

目前,国内外围绕UAT数据链和ADS-B接收设备监视容量评估进行了相关研究。Strain等^[8]探究了在小型无人机上应用UAT的可行性。Roy^[9]使用互补金属氧化物半导体(Complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺开发UAT发射芯片,且芯片可在960~1 164 MHz频率范围内工作,符合UAT2数据链的频率要求。刘海涛等^[10]通过理论分析得出星基ADS-B接收机位置报文更新间隔及监视容量的计算方法并建立了星基ADS-B仿真系统验证。Van等^[11]和Martín等^[12]建立了不同的模型进行ADS-B性能仿真。虽然这些模型的建模思路可以借鉴,但其并不适用于城市空中交通系统中的低空飞行器。Barrett等^[13]提出了一种基于无人驾驶航空器系统(Unmanned aircraft system, UAS)数量、模拟的区域半径和

接收信号强度的978 MHz UAT模式的ADS-B的空对空性能模型,分解了共信道干扰的原因并提出了相应的解决方案,但方案在实际情境下较难实现。王尔申等^[14]将“北斗”导航与ADS-B监视技术结合,实现了基于“北斗”定位数据的多链路通航飞行姿态监视。唐涛^[15]总结了一套适用于星载环境的UAT接收处理算法并完成了灵敏度测试。汤新民等^[16]针对通用航空飞行活动的安全监视问题,基于网格划分分析了ADS-B地面站对真实高度的监视信号覆盖范围,并据此对ADS-B地面站的选址进行分析。

国内外现有的ADS-B接收设备监视容量的评估研究有以下几方面不足:目前主要集中在设计及实现等方面,对设备实际工作状态下的性能探究较为匮乏。虽然国外已有对UAT模式ADS-B监视容量评估的研究,但仅通过控制降低发射端射频信号的功率,以减少高流量空域情境下UAT模式ADS-B报文的重叠现象。发射功率的降低可能会导致监视距离和范围降低,在应用层面难以实现。

针对目前已有研究的不足和未来UAT2监视数据链扩容的需求,本文首先建立UAT2模式下ADS-B接收设备的报文接收处理过程模型,并根据UAT2数据链的收发特点,将泊松过程和二项分布等概率统计模型相结合,通过理论分析得出UAT2接收设备报文成功接收概率与报文传输过程中信道误码率、接收设备处理速率及报文成功处理概率之间关系的理论计算模型,最后根据理论模型给出UAT2模式下ADS-B接收机的监视容量计算方法,并对比计算机仿真结果与样机测试结果以验证其合理性,量化评估低空高密度情境中UAM飞行器的UAT2模式ADS-B接收设备监视性能。

1 UAT2模式ADS-B系统收发模型

1.1 UAT2模式发射过程

UAT模式ADS-B的收发技术规范在航空无线电技术委员会所发布的《Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA)DO-282B》^[17]规章中进行了阐述。UAT2数据链在UAT数据链的基础上,针对未来低空与超低空空域内的UAM飞行器运行特点进行升级,且支持多个广播服务,包括广播式飞行情报服务(Flight information service-broadcast, FIS-B)和广播式交通信息服务(Traffic information service-broadcast, TIS-B)以及ADS-B^[18-19],此外UAT2数据链支持在ADS-B消息段发送UAM飞行器的健康状况信息,符合当前的RTCA DO-282 UAT调制方案和前向纠错(Forward error correction, FEC)格式,并提供可寻

址上行链路通信^[20]。在 UAT2 信道上有两种基本类型的广播传输消息:ADS-B 消息和地面上行消息。均由 3 个基本部分组成:36 bit 同步码(Synchronize, SYNC)、根据短 ADS-B 消息体和长 ADS-B 消息体分为 144/272 bit 载荷信息位和 96/112 bit 前向纠错码奇偶校验消息位。ADS-B 消息体结构见图 1。

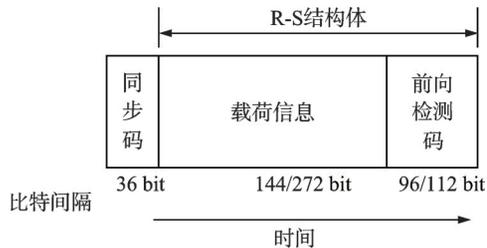


图1 ADS-B消息体结构

Fig.1 Structure of ADS-B message

UAT2 模式 ADS-B 信息传输采用时间分隙和随机接入技术的组合进行控制。每一个 UAT2 帧持续 1 s, 并从每个世界协调时(Coordinated universal time, UTC)秒的起点开始。每帧分为地面段和 ADS-B 段, 段间设置了保护时间以允许信号传播和时序漂移。ADS-B 消息段长度共 800 ms, 进一步划分为消息启动机会(Message start opportunity, MSO)。MSO 会按照 250 μ s 的间隔进行排列, 此间隔为 UAT2 模式用于调度消息传输的最小时间增量, 所有 ADS-B 消息体的传输必须在有效的 MSO 上开始, 可确保 UAT2 模式 ADS-B 数据传输的正确协调和同步, 有助于实现 UAM 飞行器与地面站之间高效、有序的通信。UAT2 帧结构如图 2 所示。

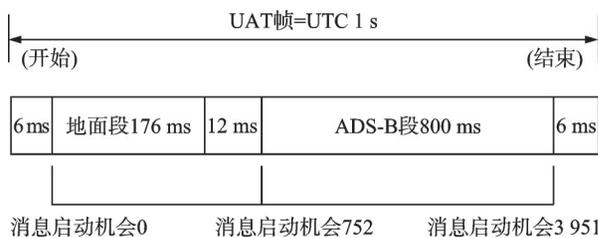


图2 UAT2帧结构

Fig.2 UAT2 frame structure

自 MSO 752 至 MSO 3 951 共 3 200 个 MSO 为 ADS-B 消息段, 时间总长度为 800 ms。所有 UAM 飞行器发送的 ADS-B 消息和地面发送的 TIS-B 消息都在这个帧段内进行传输, 每架装备了 UAT2 设备的飞行器在每一帧中只进行一次 ADS-B 消息传输, 并从该段中的 3 200 个 MSO 中伪随机选择一个 MSO 开始传输消息。

1.2 ADS-B 报文接收处理过程

在 ADS-B 接收机处于工作状态时, 将接收到的 ADS-B 射频信号进行流程化处理, 最终得到

ADS-B 报文内容信息。但处理的具体过程会根据接收机不同设计产生差异。为方便理论分析, 本文以基础的单线程接收机为例, 暂没有考虑多线程协同工作情景下的 ADS-B 报文接收处理情况。单线程接收机由相关器、寄存器、Read-Sdomon(R-S)解码器构成, 具体结构如图 3 所示。

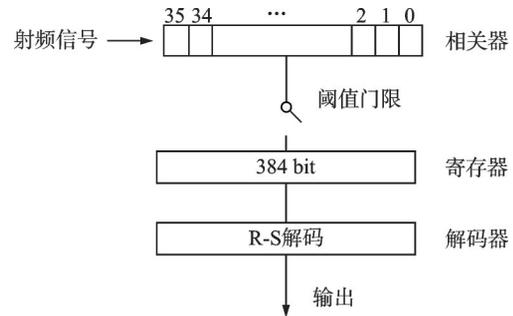


图3 UAT2接收设备结构

Fig.3 Structure of UAT2 receiving equipment

此设计中, 接收机将获取的 ADS-B 射频信号经连续相位频移键控(Continuous phase frequency shift keying, CPFSK)解调为有效的电平信号并采样后, 采样信号将转换为 UAT 格式的帧, 接收机则根据规定的 36 bit 同步码对相关器的高低位进行设置, 以判断 UAT 帧是否有效。当有效 UAT 帧按位通过相关器后, 将按照顺序临时储存在寄存器中为后续解码纠错做准备。因此寄存器的大小应不低于长报文的 384 bit 以满足 UAT 帧的临时存储需求; 当 1 个 UAT 帧全部进入寄存器后, 将传入解码器中进行解码输出操作。

2 UAT2接收系统模型

2.1 报文监测纠错模型建立

UAT2 模式下, ADS-B 消息体的前 36 bit 为 SYNC 同步序列, 相关器会将采样到的电平信号样本与同步序列进行比较, 若 36 bit 同步码中有不少于 n 位与同步序列一致, 则认为检测到了有效信号。现设 P 为信道误码率, 则每位二进制数传输正确的概率均为 \bar{P} 。由于 SYNC 同步序列中每一位是否正确的概率均独立, 用 $P(X=n)$ 表示 36 bit 同步码中有 n 位通过相关器的概率为

$$P(X=n) = C_{36}^n (1-P)^n P^{(36-n)} \quad (1)$$

由式(1)可得, 同步序列中正确个数符合不少于 n 位规定的概率 $P\{X \geq n\}$ 符合二项分布

$$P_A = P\{X \geq n\} = \sum_n^{36} C_{36}^n (1-P)^n P^{(36-n)} \quad (2)$$

式(2)表明: UAT2 模式下 ADS-B 报文可通过相关器监测的概率由射频信号在传输过程中的信道误码率 P 与规定同步序列可通过相关器的位数 n 联合决定。 n 的起始值由实际情况给定。在同步

序列可通过相关器的位数 n 给定之后,信道误码率值越低,则 ADS-B 报文可通过相关器监测的概率越高。

现将接收到的二进制序列可通过相关器检测并传送至寄存器记为事件 A ,事件 A 发生后,寄存器根据 UAT2 接收设备的工作原理将 ADS-B 消息体发送至解码器内进行解码工作。

UAT2 模式下的 ADS-B 报文内容在发射过程中采用的信道编码方法为 R-S 编码,其纠错能力会根据 $RS(n, k)$ 的长度存在限制,可纠错最大字节数 t 为 $(n - k)/2$,对于长 ADS-B 消息体 $RS(48, 34)$ 和短 ADS-B 消息体 $RS(30, 18)$ 对应的纠错能力分别为 7 和 6。在报文接收的过程中如果产生错误的字节数大于其纠错能力,则无法正常进行 R-S 解码,该报文视为接收失败。因此,需对传输过程中数据链误码率的下限进行要求,使得接收机可正常进行纠错。对于 $RS(n, k)$,字节错误率为

$$P_s = 1 - (1 - P)^8 \quad (3)$$

式中: P_s 为符号错误率(Symbol error rate, SER),表示单个字节符号产生错误的概率,即信道误码率。在得到单字节错误率后,由于每一字节发生错误的概率相同且独立,则在 n 个字节中有 j 个字节出现错误的概率符合二项分布概率公式,错误字节的个数为 j 时的概率为

$$P(X = j) = C_n^j P_s^j (1 - P_s)^{n-j} \quad (4)$$

UAT2 设备在接收工作状态时,以处理 ADS-B 长消息体为主。对于长 ADS-B 消息体 $RS(48, 34)$ 和短 ADS-B 消息体 $RS(30, 18)$,错误字节个数 j 的取值范围分别为 $j \leq 7$ 和 $j \leq 6$,综合 ADS-B 长短消息体的纠错能力,需同时满足长短报文的纠错需求,因此以基础 ADS-B 短消息体的纠错能力选择 j 值,即 $j \leq 6$ 。现将由于 ADS-B 消息体出现错误字节数不大于其 R-S 纠错能力,UAT2 接收设备可正常进行 R-S 解码记为事件 B ,事件 B 发生的概率为

$$P_B = \sum_{j=0}^6 C_{48}^j P_s^j (1 - P_s)^{48-j} \quad (5)$$

在得到事件 A 和事件 B 发生的概率之后,通过计算事件 A 与事件 B 同时发生的概率,求得在接收到解调序列后,成功通过相关器检测并且符合解码器能力要求的概率为

$$P(A, B) = P(A)P(B) = \sum_n C_{36}^n (1 - P)^n P^{(36-n)} \cdot \sum_{j=0}^6 C_{48}^j P_s^j (1 - P_s)^{48-j} \quad (6)$$

式(6)表明:UAT2 模式下 ADS-B 接收设备接收到解调序列后成功通过相关器检测并且符合解码器能力要求的概率由调制信号在传输过程中的

信道误码率 P 与规定同步序列可通过相关器的位数 n 联合决定。在同步序列可通过相关器的位数 n 给定之后,信道误码率值越低,则接收机处理单条 ADS-B 报文的成功率越高。

2.2 报文重叠模型建立

在多 UAM 飞行器运行的场景中,随着 ADS-B 设备接收范围内飞行器数量的增多,不同目标源发射的 ADS-B 信号在到达接收端不可避免会产生报文重叠的现象。与 1090ES 模式 ADS-B 不同,UAT2 地面段采用时分复用的接入方式。伪随机接入方式在 ADS-B 段 800 ms 共 3 200 个 MSO 中随机选择可用的信息起始位置进行传输,以减少接收设备端重叠现象的产生。但由于接收设备的工作性能和发射设备调制速率的局限性,在对前一条 ADS-B 报文处理过程中,后一条 ADS-B 报文的同步序列被同时处理。根据前一条报文的处理情况和后一条报文的到达时机可分为以下几种重叠现象,如图 4~6 所示。

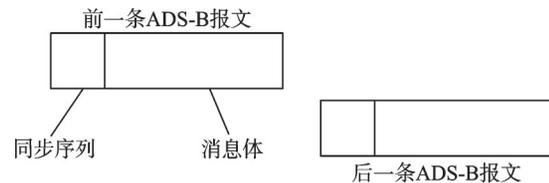


图 4 报文理想排列方式

Fig.4 Ideal arrangement of messages

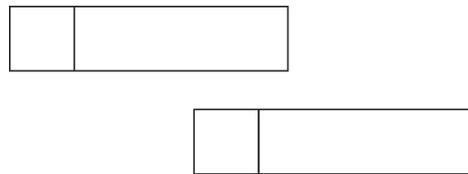


图 5 重叠现象 1

Fig.5 Overlapping phenomenon 1

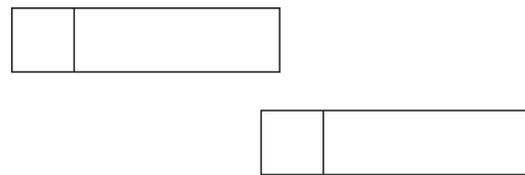


图 6 重叠现象 2

Fig.6 Overlapping phenomenon 2

在理想状态下,前一条 ADS-B 报文的信息体与后一条 ADS-B 报文的同步序列无重叠现象产生,即接收机在前一条报文的处理过程中,没有接收到新的报文,已采样报文的处理过程不存在干扰;在重叠现象 1 中,前一条 ADS-B 报文消息体部分完全覆盖后一条报文的同步序列,后一条报文的同步序列无法被接收机采样处理,此时后一条报文由于无法通过相关器视为作废。在重叠现象 2 中,前一条 ADS-B 报文的同步序列与后一条

ADS-B 报文的同步序列部分重叠,假设后一条报文的同步序列仍可通过相关器的检测,则可正常对两条报文进行解码输出。

现假设有 λ 架次安装 UAT2 发射设备的 UAM 飞行器均匀分布在 UAT2 接收设备覆盖空域内, UAT2 发射设备在每个 UTC 秒内会通过为随机分配时隙的方式,根据其所处的经纬度,在 UAT2 ADS-B 段 3 200 个 MSO 中选择报文发射时机并以每秒一条的速率向外发送。在 UAT2 发射设备发射功率相同的情况下,每秒共发射出 λ 条 ADS-B 报文。每条报文到达接收设备的时刻是独立且稳定的,符合泊松分布的随机过程。根据泊松过程定义可得,在 t 时段内,有 k 数量的 ADS-B 报文到达的概率为

$$P(k, t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (7)$$

在理想状态下,单个报文在到达接收机后的处理过程不与其他报文产生重叠现象。假设在 UTC 1 s 内的某一时刻,单个 ADS-B 报文被接收设备检测到并开始进行处理,接收设备处理单条 ADS-B 报文所需的时间为 σ , 单位 s; 根据式(7)可得在前 σ 和后 σ 两时段内无其他 ADS-B 报文的概率为

$$P = P(0, 2\sigma) = e^{-2\lambda\sigma} \quad (8)$$

针对实际场景中可能出现的重叠现象 1 与重叠现象 2,应首先规定 ADS-B 报文的同步序列部分可通过相关器的位数 n 。如果 36 bit 同步序列中重叠位的个数大于此阈值,则认为该报文无法正确进行同步,作报废处理。针对重叠现象建立模型时,需在式(8)的基础上,对接收设备处理单个 ADS-B 报文的过程时长 σ 缩减 $\Delta\sigma$, 单位 s; $\sigma - \Delta\sigma$ 表示重叠现象下可正常接收报文的临界值,在前一条 ADS-B 报文到达接收机后的 $\sigma - \Delta\sigma$ 之内,后一条到达接收机,则视此报文为可正常接收报文,其中 $\Delta\sigma$ 值由规定的重叠位数决定,最终得到重叠现象下可正常进行报文接收的概率为

$$P_{IN} = P(0, 2(\sigma - \Delta\sigma)) = e^{-2\lambda(\sigma - \Delta\sigma)} \quad (9)$$

在得到单条报文可成功通过相关器检测并且符合解码器能力要求的概率 $P(A, B)$ 和 P_{IN} 后,联立式(2)与式(9),可得单条 ADS-B 报文可被接收机成功接收的成功率 P_{SUC}

$$P_{SUC} = \sum_n^{36} C_{36}^n (1 - P)^n P^{(36-n)} e^{-2\lambda(\sigma - \Delta\sigma)} \quad (10)$$

式(10)表明,报文在重叠现象下仍可被接收设备接收处理的概率 P_{SUC} 由接收设备覆盖空域内发送 UAT2 模式 ADS-B 报文的飞行器的数量 λ 、接收设备处理单条 ADS-B 报文的时长 σ 以及信道误码率 P 联合决定。

3 模拟仿真及收发实验结果

3.1 报文监测纠错模型验证

使用 Matlab 软件为模拟实验平台,在实验中首先对相关器参数进行设置,通过控制信道误码率 P 的值,获得模拟次数内接收设备成功接收到可通过相关器并符合解码器解码能力的报文数量与发射的总报文数量的比值,并与概率模型进行对比。模拟实验参数设置见表 1。

表 1 模拟实验参数表

Table 1 Simulation experiment parameters

实验参数	取值
相关器阈值/bit	20
模拟信道误码率 P	$10^{-1} \sim 10^{-3}$
长报文比例/%	80
短报文比例/%	20
报文模拟发送次数	10 000
报元码元数量/(个·bits ⁻¹)	384/240

在实验中,将根据规章所给标准长短报文作为发射内容。长报文模拟传输 34 B 的消息载荷(字节 1~34)和 14 B FEC 纠错码(字节 35~48),短报文模拟传输 18 B 的消息载荷(字节 1~18)和 12 B FEC 纠错码(字节 18~30)。实验长短报文内容均由发射端随机生成。

现设置相关器阈值参数 n 取 20 作为模拟实验参数,即报文同步序列不少于 20 bit 同步码,比对成功即可将接收序列传送至寄存器内进行解码,根据式(10)可得

$$P(A, B) = \sum_{n=20}^{36} C_{36}^n (1 - P)^n P^{(36-n)} \cdot \sum_{j=0}^6 C_{48}^j P_s^j (1 - P_s)^{48-j} \quad (11)$$

实验为模拟信道传输,根据实验参数表进行设置,通过按比例重复随机发送长短报文数据 10 000 次。记录通过相关器并错误字节数不超过 6 个的次数为成功;记录在不同误码率的情况下,成功次数与 10 000 的比值为传输成功率 $P(A, B)$,最终得出在信道误码率 P 在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 范围内,步长为 0.001 的传输成功率,并记点 (X, Y) ,其中 X 为误码率 P , Y 为传输成功率 $P(A, B)$ 。实验得到的结果 (X, Y) 如图 7 中空点所示。将实验结果 (X, Y) 与式(11)生成的概率曲线进行拟合,拟合结果如图 7 所示。

对比实验结果与模型概率曲线的拟合结果可得出以下结论:(1)实验结果与模型概率曲线在联合概率较高时存在极大程度拟合,可证明概率模型

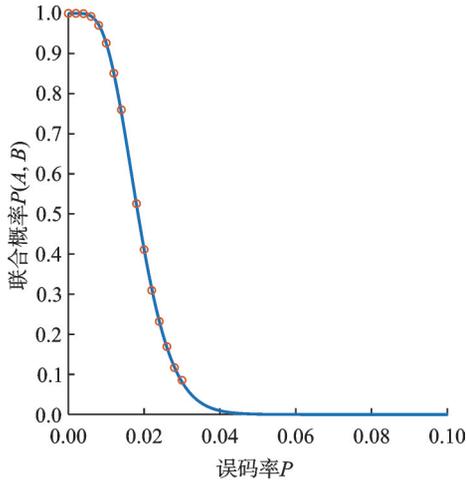


图7 模拟实验结果与模型结果拟合对比

Fig.7 Fitting comparison between simulation experiment results and model results

的正确性;(2)随着信道误码率 P 的升高,在 P 值达到0.04时,接收设备无法正常接收射频信号;(3)在信道误码率在0.01以下时,符合接收设备工作性能的报文数量可达90%以上,具有较好性能;(4)如果将信道误码率控制在 10^{-2} 及以下,可实现UAT2收发设备在工作状态下报文的接收及解码等功能。

3.2 报文重叠模型实验环境搭建及验证

首先定制实验方案并搭建实验环境:使用德州仪器CC1310开发板做发射端,此开发板可进行UAT2数据链ADS-B信号调制与发射。通过控制发射端模拟 λ 数量的UAM飞行器,按照每秒1条的速率在每个UAT2帧的ADS-B消息段800个MSO中随机选择发射时机进行报文发送。接收设备选择德州仪器CC1312开发板进行接收,此开发板在接收到UAT2模式ADS-B消息后可进行解调采样。通过计算实验时间内接收机成功处理的报文数量与发射的总报文数量的比值,验证模型正确性。实验流程与实验环境如图8和9所示。实验环境设置参数表如表2所示。

针对ADS-B报文重叠模型,根据式(10)中影响单条ADS-B报文接收成功率的自变量设置实验参数进行实验,通过控制变量法改变信道误码率 P ,以得到在不同误码率情形下,单条ADS-B报文接收成功率 P_{SUC} 与UAM飞行器数量 λ 的模型曲线,并与实验结果进行对比,以验证模型的正确性。



图8 接收实验流程图

Fig.8 Flowchart of reception experiment

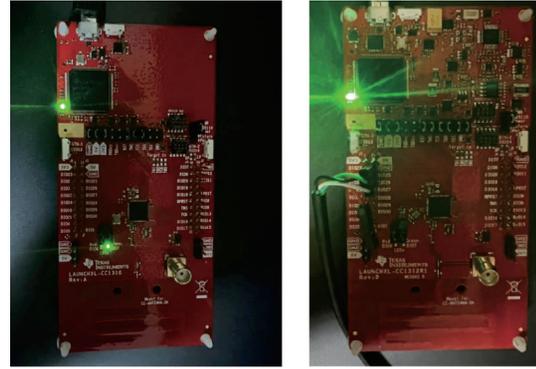


图9 发射端与接收设备示意图

Fig.9 Schematic diagrams of the transmitter and the receiving equipment

表2 实验设置参数

Table 2 Experimental setting parameters

实验参数	取值
相关器阈值/bit	20
信道误码率 P	$10^{-1} \sim 10^{-3}$
长报文比例/%	80
短报文比例/%	20
发射报文数量	λt
发射时长	t

控制式(8)中变量单条报文处理时长 σ ,以求得在接收设备覆盖空域内可发送UAT2模式ADS-B报文的飞行器的数量 λ 与函数关系。在RTCA DO-282B中,规定了发射信号的调制速率为 1.31072×10^5 bit/s。设接收设备处理速率为调制速率的 ω 倍。考虑到在传输和接收的过程中存在延迟,因此 ω 的值不应该超过调制速率,即 ω 的取值范围为 $0 \sim 1$,现规定处理单条报文的时长为(单位:s)

$$\sigma = \left(\frac{48}{1.30208\omega} \right) \cdot 10^{-5} \quad (12)$$

根据重叠现象2中ADS-B报文同步序列重叠部分不超过 m 个字节为可控重叠报文,即报文在重叠现象下仍可被接收设备接收并进行处理,可得

$$\Delta\sigma = \left(\frac{m}{1.30208\omega} \right) \cdot 10^{-5} \quad (13)$$

将以上设置参数代入式(10)中可得重叠现象下可正常进行报文接收的概率

$$P_{SUC} = \sum_n^{36} C_{36}^n (1-P)^n P^{(36-n)} e^{-2\lambda \left(\frac{48-m}{1.30208\omega} \right) \cdot 10^{-5}} \quad (14)$$

根据实验参数表2中数据进行实验。接收机处理速率的倍率 ω 为0.99,ADS-B报文同步序列重叠部分不超过2B为可控重叠报文。分别设置信道误码率 P 的值从 10^{-3} 增加至 10^{-1} ,信道误码率 P 值每次增加后调整发射端每秒随机发送报文的数量 λ 从100加至600,单位条;基础实验持续时长

为 90 s,发射端每秒随机发送报文的数量 λ 每增加 100,实验时间增加 15 s 以验证在确定接收机处理速率的倍率 ω 的情况下,信道误码率 P 值和监视容量的变化关系。最终得到总实验时间内成功接收到的报文数量和 λ 与实验时间之积作比值。

通过统计总实验时间内成功接收到的报文数量和 λ 与实验时间之积的比值得到不同误码率情况下的实验结果如表 3~4 所示。

表 3 $P=10^{-3}$ 实验结果

Table 3 Experimental results of $P=10^{-3}$

参数	$\lambda=100$	$\lambda=200$	$\lambda=300$	$\lambda=400$	$\lambda=500$	$\lambda=600$
收发时长/s	90	105	120	135	150	165
总发射数量/条	9 000	21 000	36 000	54 000	75 000	99 000
总接收数量/条	7 738	15 963	23 364	30 508	36 451	43 659
接收成功率	0.860	0.761	0.649	0.565	0.486	0.441

表 4 $P=10^{-2}$ 实验结果

Table 4 Experimental results of $P=10^{-2}$

参数	$\lambda=100$	$\lambda=200$	$\lambda=300$	$\lambda=400$	$\lambda=500$	$\lambda=600$
收发时长/s	90	105	120	135	150	165
总发射数量/条	9 000	21 000	36 000	54 000	75 000	99 000
总接收数量/条	7 182	14 151	21 672	28 674	34 650	37 422
接收成功率	0.798	0.691	0.602	0.531	0.462	0.378

将不同误码率情况下的实验结果与式(14)的函数生成曲线图像进行拟合,如图 10 所示。

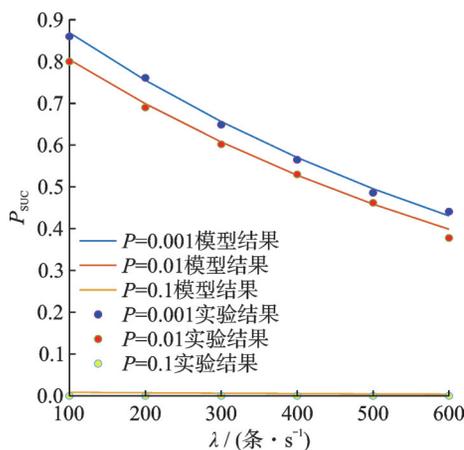


图 10 不同误码率 P 下报文接收成功率 P_{suc} 与随机发送报文数量 λ 的关系

Fig10 Relationship between the packet reception success rate P_{suc} and the number of randomly sent packets λ under different bit error rates P

图 10 中的实验结果与模型结果的对比可表明:(1)接收设备处理单条报文速率和信道误码率 P 直接决定了接收设备的工作能力;(2)随着 UAM 飞行器数量增多,ADS-B 报文重叠现象严重,接收设备报文接收成功率迅速下降,导致接收设备监视容量下降;(3)以报文接收成功率 P_{suc} 不低于 50% 为期望值,信道误码率为 10^{-2} 时,接收设备监视容量可达到 447 条/s,误码率为 10^{-3} 时,接收设备监视容量可达到 508 条/s,实验结果与理论模型结果存在较大契合度,可验证模型的正确性。

4 结 论

通过对 UAT2 模式下 ADS-B 报文发射与接收过程进行分析,将报文收发过程与泊松过程和二项分布等概率公式结合建立模型,并得出在报文无重叠和报文重叠的情况下,接收设备的监视容量由信道误码率和接收设备工作性能共同确定。在接收设备工作性能确定的前提下,信道误码率对报文接收成功率有直接影响。随着信道误码率的升高,接收设备对单条报文的接收成功率和对该报文的 RS 解码成功率会显著降低,导致监视容量降低。在信道误码率为 10^{-2} 时接收设备监视容量可达到 199 条/s,误码率为 10^{-3} 时,接收设备监视容量可达到 256 条/s。随着信道误码率的降低,UAT2 模式 ADS-B 接收设备的监视容量将显著提升。Matlab 仿真实验与实机实验结果表明:实机实验结果与模型生成结果重合度较高,验证了本模型的正确性,为当前 UAT2 数据链监视容量评估提供了一种较为可靠的方法。

在信道误码率的值确定的情况下,由于调制速率的限制,接收设备的监视容量存在上限。在提高发射设备调制速率的前提下,接收设备处理单条报文的处理速率可以得到提升,工作状态下的监视容量可以提升。

参考文献:

- [1] 郑秀梅,李智恒.城市空中交通研究进展与趋势[J].飞行力学,2025,43(1):10-18.
ZHENG Xiumei, LI Zhiheng. Research progress and trends of urban air mobility[J]. Flight Dynamics, 2025, 43(1): 10-18.
- [2] 汤新民,顾俊伟,刘冰,等.低空监视技术及其发展趋势综述[J].南京航空航天大学学报,2024,56(6):973-993.
TANG Xinmin, GU Junwei, LIU Bing, et al. Review on low-altitude surveillance technology and its development trend[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 973-993.

- [3] 杨成, 林琳. ADS-B数据链应用风险与对策研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(21): 98-101.
YANG Cheng, LIN Lin. Study on application risk and countermeasure of ADS-B data link[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(21): 98-101.
- [4] GUTERRES M, JONES S, ORRELL G, et al. ADS-B surveillance system performance with small UAS at low altitudes[C]//Proceedings of AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace. Reston, USA: AIAA, 2017: 1154.
- [5] STOUFFER V L, COTTON W B, DEANGELIS R A, et al. Reliable, secure, and scalable communications, navigation, and surveillance (CNS) options for urban air mobility (UAM)[EB/OL]. (2020-08-12). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205006661>.
- [6] 陈晓, 毛焯炳. ADS-B技术在低空空域安全中应用的现状与展望[J]. 电子测量技术, 2022, 45(20): 61-67.
CHEN Xiao, MAO Yebing. Status and prospect of ADS-B technology application in low-altitude airspace security[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(20): 61-67.
- [7] STOUFFER V L, COTTON W, IRVINE T, et al. Enabling urban air mobility through communications and cooperative surveillance[C]//Proceedings of AIAA Aviation 2021 Forum. Reston, USA: AIAA, 2021: 3172.
- [8] STRAIN R, DEGARMO M, MOODY J. A lightweight, low-cost ADS-B system for UAS applications [C]//Proceedings of AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit. Reston, USA: AIAA, 2007: 2750.
- [9] ROY P. High-power high-efficiency multi-functional CMOS radio frequency integrated circuits for wireless communication of Unmanned Aircraft System (UAS) [D]. Fargo, USA: North Dakota State University, 2017.
- [10] 刘海涛, 王松林, 秦定本, 等. 星基ADS-B接收机监视容量分析[J]. 航空学报, 2018, 39(5): 321866.
LIU Haitao, WANG Songlin, QIN Dingben, et al. Performance analysis of surveillance capacity of satellite-based ADS-B receiver[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(5): 321866.
- [11] VAN DER PRYT R, VINCENT R. A simulation of signal collisions over the north Atlantic for a spaceborne ADS-B receiver using aloha protocol[J]. Positioning, 2015, 6(3): 23-31.
- [12] MARTÍN J P, GARCIA E, FOLONIER F, et al. Satellite ADS-B messages collision simulation[C]//Proceedings of V III Scientific Conference on Telecommunications, Information Technologies and Communications. [S.l.]: Academia, 2015: 1-7.
- [13] BARRETT J A, GREEN T, PETERSON C K, et al. Modeling of universal access transceiver ADS-B performance capabilities in high-density airspace[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2021 Forum. Reston, USA: AIAA, 2021: 1636.
- [14] 王尔申, 宋远上, 徐嵩, 等. 基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(5): 586-591.
WANG Ershen, SONG Yuanshang, XU Song, et al. Navigation and surveillance technology based on “Beidou” for general aviation aircraft in low altitude airspace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(5): 586-591.
- [15] 唐涛. 星载高灵敏度UAT接收机算法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
TANG Tao. Research and implementation of algorithm for spaceborne high sensitivity UAT receiver [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [16] 汤新民, 张颖, 胡钰明, 等. 基于网格划分的ADS-B地面站信号覆盖及选址分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1114-1120.
TANG Xinmin, ZHANG Ying, HU Yuming, et al. Analysis on signal coverage and site selection for ADS-B ground station based on grid division[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1114-1120.
- [17] Radio Technical Commission for Aeronautics. Minimum operational performance standards for universal access transceiver (UAT) automatic dependent surveillance-broadcast: DO-282B[S]. [S.l.]: RTCA, 2011.
- [18] 李乃瑞. UAT模式ADS-B信号接收机的数据处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
LI Nairui. Research on data processing technology of UAT mode ADS-B signal receiver[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [19] 李德胜. 基于UAT数据链的ADS-B机载系统的设计与实现[J]. 航空维修与工程, 2012(2): 56-59.
LI Desheng. The design and implementation of ADS-B airborne system based on UAT datalink[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012(2): 56-59.
- [20] 张德银, 余潇, 刘志勇, 等. UAT ADS-B信息传输与抗干扰技术研究[C]//2013年中国通用航空发展论坛. 成都: 电子科技大学出版社, 2013: 159-163.
ZHANG Deyin, YU Xiao, LIU Zhiyong, et al. Investigation of ADS-B information transmission and its Anti-interference technology[C]//Proceedings of the 2013 China General Aviation Development Forum. Chengdu, China: The University of Electronic Science and Technology Press, 2013: 159-163.