

自适应容错算法在基站数据交互中的研究

喻阳俭¹, 雷磊¹, 崔新友¹, 陈世纯¹, 刘台², 朱超²

(1. 陆军工程大学 军械士官学校, 武汉 430000; 2. 武汉中原电子集团有限公司, 武汉 430000)

摘要: 针对某战术通信基站和移动端在进行数据业务交互时, 受到如无线信道不稳定、内部执行器故障和信道堵塞等影响, 从而造成传输时延较大和数据包丢失的问题, 这就要求基站有较强的自适应容错能力, 才能保证数据业务的高效完成; 提出一种实时自适应容错算法, 首先采用轮询机制来动态分配与调度任务, 减少了数据业务的分配计算时间, 其次引入缓存队列暂时缓存传输数据, 还具有多种安全数据传输路径, 提高数据传输过程中的鲁棒性和容错能力, 最后采用反馈状态机标记数据是否交互成功, 保证任务的正常运行; 实验结果证明, 在交互等量的数据业务时, 这种算法的引进能够降低数据传输过程中的平均时延, 丢包率降低至 0%~0.3%, 确保基站数据业务交互的实时性、容错性和高效性。

关键词: 基站; 数据业务; 自适应容错算法; 多路径选择

Research on Real-time Adaptive Fault-tolerant Algorithm in Base Station Data Interaction

YU Yangjian¹, LEI Lei¹, CUI Xinyou¹, CHEN Shichun¹, LIU Tai², ZHU Chao²

(1. Army Engineering University of PLA, Military Ordnance Sergeant School, Wuhan 430000, China;

2. Wuhan Zhongyuan Electronic Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: When the tactical communication base station and the mobile terminal are interacting with data services, they are affected by the instability of the wireless channel, internal actuator failures, and channel congestion, resulting in large transmission delays and packet loss. Strong adaptive fault tolerance can ensure the efficient completion of data services. The real-time adaptive fault-tolerant algorithm is proposed, firstly uses the polling round mechanism to dynamically allocate and schedule tasks, reducing the calculation time of data service allocation, and secondly introduces a buffer queue to temporarily buffer data, adopting a variety of secure data transmission paths to improve the data transmission process. The robustness and fault-tolerant capability of the system, and finally the feedback state machine is used to mark whether the data interaction is successful, to ensure the normal operation of the task. The experimental results prove that the introduction of this algorithm can reduce the average delay of data transmission and the packet loss rate to 0%~0.3% when interacting with the same amount of data services, ensuring the real-time and real-time data service interaction of base stations. Fault tolerance and efficiency.

Keywords: base station; data services; adaptive fault-tolerant algorithm; multipath transmission

0 引言

目前战术通信相比民用通信技术来说传输速率较低, 最高传输速率一般在几百 kbit/s 左右, 传输的内容通常分为语音和数据两种格式, 视频由于信息量大在传输过程中效果不好, 限制了作战应用和作战效果。随着通信技术的快速发展, 尤其是现代战争作战概念的变化, 数据量的快速增长, 必须采用高的传输速率、高的网络性和高的移动性数据传输途径, 就需要优化现有通信技术手段^[1-4]。文献[3]详细介绍了国内外军用无线接入技术的发展研究过程、关键技术和应用场景等内容。考虑战场上复杂的环境和各种情况下的通信需求, 需要一种灵活性强的组网技术手段。

文献[4]中提出一种专用调度通信系统, 由中央系统控制中心、软件管理终端、基站中心台、移动接入点等组

成。系统采用公共使用的信道, 同时对空闲的信道进行动态分配, 在某个时隙没有被分配为数据信道时, 可以暂时将该时隙作为信令时隙使用, 当该时隙用于信令传输时, 在确保信令传输的可靠性的同时, 其调制方式和编码方式与信令信道相同, 可以进一步提升系统抗干扰能力和纠错能力。

任何一个用户在控制中心的控制下, 通过调用系统信道资源中的空闲信道可与系统中的另一用户进行通信, 最后实验结果证明, 该调度通信系统稳定性好、抗干扰能力强和组网灵活。

基于军用通信的特点, 以军用电台作为无线信道平台, 采用保密性强、稳定性好的标准协议可以满足实时交互的业务需求, 同时还需要具备一些抗干扰能力。目前采用较多的是超短波电台, 通信距离上最大可以覆盖几十千米范

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-05-19。

作者简介: 喻阳俭(1994-), 男, 湖北大悟人, 研究生, 助教, 主要从事智能控制理论和网络通信方向的研究。

引用格式: 喻阳俭, 雷磊, 崔新友, 等. 自适应容错算法在基站数据交互中的研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 230-235.

围内的用户。同时, 基站一般都是由超短波电台配接网络控制设备、交换机组成, 通过交换机的控制, 可以实现不同小区之间的电台进行互联互通, 传输语音和视频等信息, 通过合理规划基站部署, 移动用户可以在整个无线信号覆盖区域内随遇接入^[4]。

为了充分利用信道资源, 无线节点之间的通信组网方式一般有两种: 无中心自组网方式和中心组网方式。自组网方式是各个节点之间相互配合组网, 可以允许多个节点的加入, 用户节点之间可以相互数据传输, 孤立节点对网络运行的影响小, 网络成本较低, 当一条链路出现问题时, 可以切换到其它接入点, 不会影响整个网络的通信性能。这种通信模式在军事通信中也得到了广泛的运用。“基站—移动端”的组网方式属于中心组网方式, 引入了中心节点的最大好处就是中心节点来控制数据的分发, 通过控制上行和下行数据的传输时机, 最大程度上行道使用效率, 为此而增加的基站设备和控制信道开销, 其脆弱性是显而易见的, 当移动端数量增多时, 需要处理大量复杂的数据量, 这就需要基站具有一定的容错能力^[5-9]。

随着民用通信技术的发展, 在解决军用特定数据业务传输问题时, 可以考虑民用数据业务传输的技术和方法进行研究。由于考虑到保密性, 目前关于军用基站相关的研究文献较少。本文主要借鉴相关数据交互中容错算法的思路, 经过优化之后应用于特定的基站传输中, 只针对软件部分进行设计优化, 不改动任何硬件结构。

1 基站的系统模型

1.1 硬件结构

RAP 是无线接入模式 (radio access pattern) 的简称, 或特指无线接入系统中的无线接入点 (radio access point)。交换机、4 部或 6 部基站超短波电台和其它相关辅助设备组成基站交换平台 (简称基站), 以移动话/移动超短波电台作为移动终端接入节点。终端接入节点以 RAP 超短波为链路接入基站, 基站之间通过微波、有线或双模卫星组成骨干网, 构成了以基站为中心支持全双工语音、IP 数据和短信等综合业务的接入系统, 而且移动终端接入节点和基站都具有移动能力, 是完全的动中通信系统。

指挥系统的语音、数据和短信等业务通过移动终端接入节点接入基站交换平台, 基站完成处理、路由, 通过干线信道传输到目的基站交换平台, 再通过超短波链路到达目的移动终端接入节点, 并最终传输到目的指挥系统, 完成遂行作战指挥。RAP 系统具备动中支持 IP 数据的能力, 基站采用的数据业务台实现对数据的支持, 为保证数据台信道得到充分利用, 系统采用基站集中控制的接入方式, 基站决定移动数据台的数据接入时机和策略。

RAP 数据接入和传输由信令台和数据台配合完成, RAP 系统中下行信令信道相对空闲, 基于这个特性, 基站采用在下行信令信道上轮询数据中继台, 数据中继台在数据台信道上应答响应, 并完成数据传输。

1.2 软件设计

如图 1 所示, 基站的工作流程大概可以划分为 3 个过程, 在阶段 1 完成握手流程; 在阶段 2 完成同步入网管理流程; 在阶段 3 完成数据业务交互过程。在阶段 1, 基站与所连接的设备建立链接关系, 确定基站端身份。有关阶段 2 具体时间间隔, 每个无线终端在下行链路接收相应数据, 同时每个无线终端在上行链路发射数据, 每个无线终端在被指定的间隔内进行侦听, 在指定接收间隔外, 无线终端就处于功率休眠状态, 在阶段 3 处理无线终端控制数据帧中, 没有安排上行传输时隙的终端称为无源终端, 无源终端由基站进行轮询, 是否在下一个控制数据帧中需要时隙, 在建立新的连接时, 把每个控制数据帧用于连接的时隙的号码通知给无线终端和基站, 以确保数据帧通过下一个轮询周期转发至相应站点。

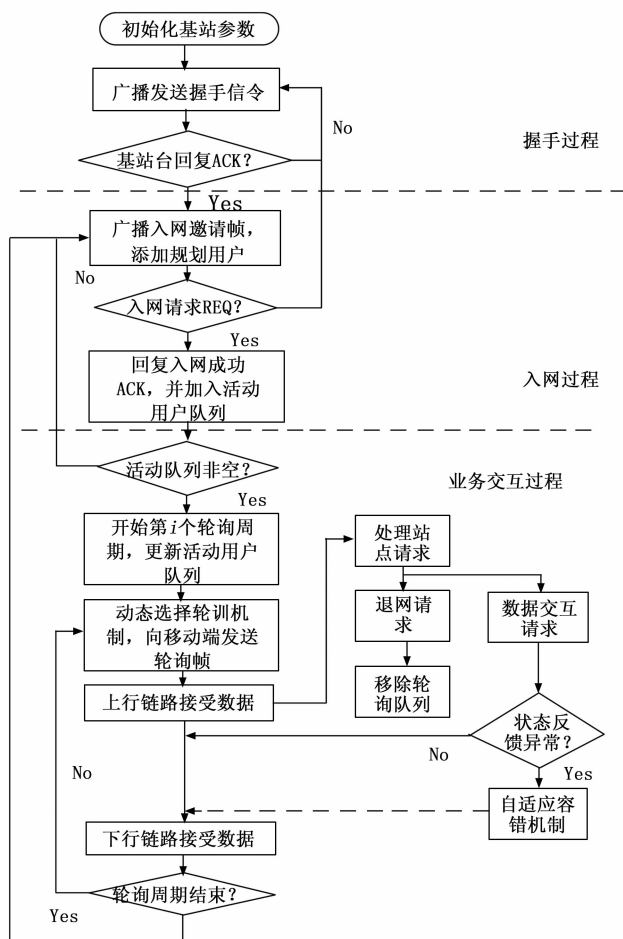


图 1 基站工作流程

本文在 ubuntu 平台上进行开发, 开发语言为 C 语言, 需要安装相关的库来进行程序的开发与编译。软件的设计主要需要完成 3 个阶段, 即完成握手过程, 入网过程和业务交互过程, 设计依据是按照相关通信协议格式来完成的。在实验过程中, 开发相适应的配置管理软件, 进行相应参数的设置, 进而来完成电台角色的转变。采用缓存队列和状态机的方式来进行自适应容错算法的实现。缓存队列来

缓存即将交互的数据，如果状态机反馈异常，需要重新选择路径并将数据从缓存队列中取出来，再进行发送。数据的交互成功必须是一个双向应答的过程。

当数据交互完毕后，移动端可能因为信道的切换而退出组网，此时基站会收到移动端发送的退网信息，进行注销移动端相关信息，退网流程完毕。软件的实现过程逻辑清晰，明确了系统的工作流程和状态，最大限度的保证数据传输的成功率。

2 自适应容错算法的实现

在实际通信过程中，自适应容错算法主要有两个重要的过程：首先为了提高基站与移动端数据交互的实时性，采用动态轮询机制能够提高移动端的数据接入效率，对于多移动节点的情况下，能够在一定程度上解决数据交互资源的均衡性；其次采用多路径数据传输策略，利用马尔科夫进行建模，能够有效减少网络网络的拥塞程度，充分利用马尔科夫的状态反馈功能，当某条数据链路传输异常的同时，重新选择另外一条链路进行传播，从而确保数据的可靠交互。

2.1 动态调度轮询机制

轮询策略能够充分利用信道的资源，外国学者 R. B. Cooper 搭建了轮询策略的数学模型，在这个模型的基础上，Hashida 从各个方面更加细化描述了轮询策略的数学模型。外国知名研究机构采用基于令牌方式的无线令牌环协议的方式来进行动态分配：根据移动端的数量和需要传输数据量的变化来动态分配时隙，充分利用信道的资源。动态分配方案需要充分考虑各种可能出现的数据传输情况，实现的过程中比较复杂，并要为传输新的分配而开销信道^[10-12]。

在实际过程中 MS (mobile station) 在访问需要数据传输的信道之前向 BS (base station) 注册；因此，BS 知道所有注册 MS 的注册信息和 MS 的总数。在图 2 中存在两种轮询模式，单播模式和多播模式，BS 将从单播切换到多播轮询对于单播轮询来说，可用带宽是不够的。此外，在单播轮询模式下，轮询延迟根据 MSS 的总数线性增加，在这种情况下不能及时处理大量需要进行数据传输业务。因此本文提出一种在单播和多播轮询模式之间切换轮询模式。在战术通信系统中，其中无线传输范围可达几十千米。采用轮询访问控制基站 (BS) 依次轮询移动站点 (MSS)，当 BS 中有大量 MSS 时，它将增加轮询延迟。

较长时间的无效轮询，可能不能保证实时服务的 QoS (quality of service) 网络服务质量要求，为指定的网络通信提供更好的服务能力，从而还会产生网络的一系列安全问题，会带来网络延迟和阻塞问题的产生。在不进行单播轮询的情况下会导致较长的等待时间。因此，本文提出了一种自适应轮询方法来切换轮询模式，采用 MSS 数和剩余带宽两个因素，来确定单播或者是多播模式。

单播模式可以建立基站和客户端点到点的连接，客户

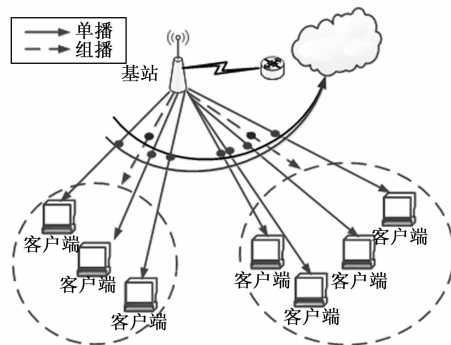


图 2 单播和多播轮询机制

端可以从基站接受数据流。多播是一种介于单播通信和广播通信^[13]之间的一种通信方式，它可以将基站想要发送的数据传递至一个子网的不同接受客户端^[14-15]。在传递数据的过程中，发送端和接受端都不需要知道对方的具体情况，但是当多播模式下需要占用较多的信道资源，需要同时考虑信道的带宽。如图 3 中所示，在没有数据交互过程中，单播轮询模式可能会消耗一定的时间，此时可以多播模式，同时访问下行移动终端。能够提高轮询机制的分组延迟及稳定性，以及系统中的站点接入效率^[16-19]。

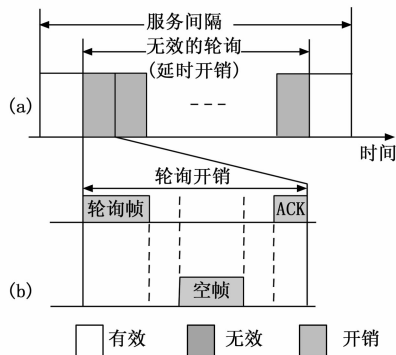


图 3 单播轮询机制时延开销

2.2 多路径选择模型

在传输数据层中可以采用多路径数据传输方案的策略，传输控制协议 (TCP, transfer control protocol) 和流控制传输协议 (SCTP, stream control transmission protocol) 两种协议可以用来实现多路径数据传输。传输控制协议在网络中应用较多，它是一种面向连接的、可靠的、基于字节流的传输层控制协议。流控制传输协议可以应用于组网通信的两端需要同时传输多个数据流的协议，它的功能与 UDP (user datagram protocol) 和 TCP 相似。本文采用的多路径传输方案，不简单在路径间进行轮询调度发送，同时考虑多路径间的特性差异，而是端到端的全部路径均可能参与数据传输。同时采用马尔科夫建立精确的数学模型，在数据发送中选择不同的策略进行数据交互，综合考虑多方面因素，可以更加有效的均衡数据流量。

2.2.1 模型建立

从马尔可夫决策^[20-24]过程四重组出发构建基于马尔可夫决策过程的动态路径选择模型。假设共有 n 条路径, n 条路径的往返时延、丢包率和最大窗口分别为 T_k, P_k, W_k , 其中 $k = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。

1) 离散状态集。在实际过程中, 当前窗口的大小做为下个窗口大小的唯一影响因素, 其状态转换过程具有马尔可夫性, 各条路径的拥塞窗口可以建立转态如下:

$$S = \{(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n) \mid \omega_k \in [1, W_k], i = 1, 2, 3, \dots, k\} \quad (1)$$

2) 行动集。假设网络中包含 n 条路径, 则两端之间共有 $2^n - 1$ 种策略, 行动可以描述为选择不同的策略来到达对端, 令 A_{all} 表示所有的行动集合, 可以简单描述为 $A_{all} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{2^n-1}\}$, 令 R 表示所有的路径集合, 且有路径选择策略 a_m 时对应的路径数目为 R_m , m 和 a 的取值空间相同。拥塞控制的要求是数据在并行传输中的公平性, 在实际过程中可能会出现由 R_x 到 R_y 的切换过程中, R_y 所包含的路径数目比 R_x 所包含的路径数目大很多的现象。在这种情况下有可能会发生并行吞吐量过高, 甚至高于单条路径的最大吞吐量, 在实际过程中需要引入约束条件, 其中 ω_k^i 表示在状态 i 时路径 k 的窗口大小。

3) 状态转移概率。从文献 [11] 中可以得出, 在行动 a_m 时的拥塞控制可以表示为:

(a) 如果在路径 k 上数据传输成功, 此时则将 ω_k 增加 $\min(\beta_m / \omega_{all}, 1 / \omega_k)$;

(b) 如果在路径 k 上数据传输失败, 此时则将 ω_k 减少至 $\omega_k / 2$;

$$\sum_{k \in R_x} \frac{\omega_k^i}{T_k} \leq \max_{k \in R} \frac{W_k}{T_k} \quad (2)$$

$$\beta_m = \omega_{all} \frac{\max_{k \in R_x} \omega_k / T_k^2}{(\sum_{k \in R_x} \omega_k / T_k)^2} \quad (3)$$

假设在经过 a_m 之后, 路径 k 经过 cnt_k^m 个分组后 ω_k 增加 1, 则路径 k 窗口的变化有两种, 即变成 $\omega_k / 2$ 或者是 $\omega_k + 1$; 其概率如公式 (5) 所示。状态 i 到状态 j 的状态转移概率如公式 (6) 所示:

$$cnt_k^m = \max(\frac{\omega_{all}}{\beta_m}, \omega_k) \quad (4)$$

$$f(p_k, cnt_k^m) = \begin{cases} (1 - p_k) cnt_k^m, & \omega_k \rightarrow \omega_k + 1 \\ 1 - (1 - p_k) cnt_k^m, & \omega_k \rightarrow \omega_k / 2 \end{cases} \quad (5)$$

$$p(j \mid i, a_m) = \prod_{k \in R_x} f(p_k, cnt_k^m) \quad (6)$$

4) 状态反馈。反馈可以描述为 $R(i, a_m)$, 即表示在状态 i 的情况下选择行动策略 a_m 之后的瞬间吞吐量。同时进行多路数据传输时, 需要考虑每条路径的差异性, 可能各条路径所需的时延不同。而对于数据交互来说, 数据包只有按照顺序依次到达才算是成功接收。其中, 往返延时最大的路径将会影响数据传输的吞吐量, $R(i, a_m)$ 可以用公式

(7) 进行数学描述, 式中 ω_k^j 表示在 j 状态下选择路径 k 的窗口值。

$$R(i, a_m) = \sum_{j \in S} P(j \mid i, a_m) \frac{\sum_{k \in R_x} \omega_k^j}{\max_{k \in R_x} T_k} \quad (7)$$

2.2.2 应用实例

考虑由于路径过多会造成并行传输吞吐量过大的情况, 选择使用 3 条路径做为实际研究, 此时拥塞窗口的集合可以表示为:

$$S = \{(\omega_1, \omega_2, \omega_3), \omega_k \in [1, W_k], k \in \{1, 2, 3\}\} \quad (8)$$

行动集合 $A_{all} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_8\}$ 中共有 7 种行动策略, a_1 表示选择路径 1, a_2 表示选择路径 2, a_3 表示选择路径 3, a_4 表示同时选择路径 1 和路径 2, a_5 表示同时选择路径 1 和路径 3, a_6 表示同时选择路径 2 和路径 3, a_7 表示同时选择路径 1、路径 2 和路径 3。当采取行动 $a_m \in \{a_1, a_2, a_3\}$ 时, 只使用 1 条路径进行数据传输, 不向其它路径调度数据, 则其它路径的拥塞窗口值大小保持不变, 状态的变化有 2 种, 且有:

$$cnt_i^j = \omega_i, i \in \{1, 2, 3\} \quad (9)$$

再由公式 (4) ~ (6) 可以进一步求出转态转移概率, 选取单条路径做为数据传输通道时, 预期吞吐量为单条路径时的吞吐量。当采取行动 $a_m \in \{a_4, a_5, a_6\}$ 时, 使用 3 条路径中的 2 条路径进行数据传输, 其它窗口的拥塞值保持不变, 状态的变化状态 4 种, 预期吞吐量为 2 条路径并行时的吞吐量。当采取行动 a_7 时, 同时使用 3 条路径进行数据传输, 状态的变化状态 8 种, 预期吞吐量为 3 条路径并行时的吞吐量。

从图 4 中可以看出, 数据包在传输过程中可以通过异常状态反馈的方式来确定, 是否成功完成数据包的交互, 当交互过程异常的时候, 采用另外一种路径进行数据传输, 保证数据传输过程中的可靠性。而且当数据较多的时候, 多路径传输可以加快传输的速度。

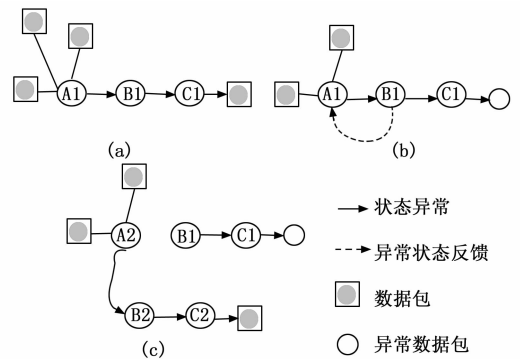


图 4 多路径数据传输示意图

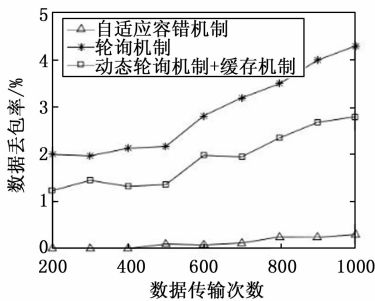
数据在传输过程中, 本来就是一个不确定状态的过程, 在无线环境中很难绝对保证数据的可靠传输, 通过反馈机制可以知道在每个流程的状态, 可以很好的采用马尔可夫模型进行建模。通过建立动态多路径传输方法, 能够有效

解决路径拥堵和数据在传输过程中丢失的问题。

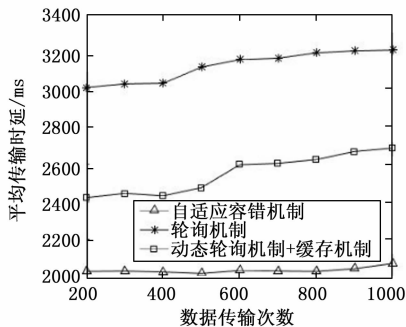
3 实验结果与分析

在战术通信网络中, 满足较好公平性指数的情况下, 数据传输时延^[25-26]和丢包率^[27]的大小将明显影响实时业务的质量。因此丢包率和时延是评价实时业务调度算法的重要指标^[28-30]。本文采用基站端下行数据进行传输过程中记录数据丢包率和时延相关参数。在实际设计中要求平均传输时延和丢包率是越低越好。

在验证基站的数据交互功能时, 采用性能稳定的接入端, 确保接入端设备的可靠性, 将自适应容错算法融入到基站数据交互中, 严格按照网络通信拓扑结构环境, 即中心基站和移动端的组网方式进行试验, 分布式、一体化的战术通信网络架构^[31]。本文在传输等量的数据业务时(考虑电台的带宽有限), 记录不同方案基站端下行数据传输实验结果, 数据由基站传输到移动端, 再由移动端返回应答报文, 整个过程记做数据传输 1 次。图 5 (a) 对基站的丢包率进行了分析, 从中可知随着数据传输次数的增多, 由于内部处理不当或者无线环境不稳定的影响, 难以保证所有的数据均传输成功, 因此会有一些数量的包被丢弃, 丢包率也随之提升。运用自适应容错机制之后, 数据传输的容错能力增强, 优先选择路径较优的通道接受调度, 会充分利用高质量的信道, 数据丢包率最高为 0.3%, 而其它两种机制的丢包率增幅较大, 最高丢包率分别达到 4.3% 和 2.8%。从平均时延的角度出发, 自适应容错机制采用动态轮询机制, 提高了信道的利用率和接入效率, 能够有效降低时延开销, 动态轮询机制和缓存机制(事先将数据包缓存, 数据交互失败重新发送)虽然可以降低一些时延开销, 当节



(a) 丢包率与数据传输次数实验结果



(b) 平均传输时延与数据传输次数实验结果

图 5 不同方案数据传输实验结果

点间传输数据时, 节点如果丢包之前数据包要经过多次传输尝试, 会浪费一定的时延开销。但是由于采用动态轮询机制之后, 能够合理利用时间进行上行和下行数据传输, 减少信道的阻塞, 在一定程度上可以保证数据传输过程中的实时性。缓存机制的作用是缓存即将交互的数据包, 可以保证从新传输数据, 也能够提高数据交互过程中的可靠性, 进而降低丢包率。

4 结束语

本文首先介绍了基站的硬件框架和软件设计流程, 通过采用动态轮询机制, 不断切换单播模式和多播模式, 提高实时性和移动端数据交互接入效率。在基础上建立了基于马尔可夫决策过程的动态路径选择模型动态路径选择方法可以在路径质量变化时有效地将数据均衡到较优路径进行传输, 在不影响并行数据传输鲁棒性的基础上提升吞吐量, 能最小化数据传输时延和降低丢包率, 对通信量进行全局最优分配, 能有效降低路径发生阻塞的概率。优化后的基站拥有传输速率高、可靠性强的能力, 可以高效和移动端之间传输语音、数据、图像和视频等多媒体业务信息, 最后在实际基站平台进行验证, 实验证明移动用户的接入是实时的、安全的和可靠的, 并可提供容错能力好的传输、计算和信息服务, 实现了数据业务交互的高效要求。

参考文献:

- [1] 王海涛, 柯 庚, 郑少仁. 一种军用综合接入设备的设计和应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23 (1): 56-59.
- [2] 何 明, 姜志平, 赵 勇. 美军下一代高级战术互联网体系结构发展研究 [J]. 指挥控制与仿真 2010, 32 (6): 121-123.
- [3] 刘曙霞. 军用无线综合接入系统研究 [J]. 电子科技, 2004 (6): 51-56.
- [4] 吴洋洋. 基于军用电台的综合通信系统集群调度网技术实现 [J]. 战术导弹技术, 2012 (1): 72-76.
- [5] 李致昊, 朱闽峰, 黄兆嵩, 等. 一个基于基站轨迹数据的城市移动模式可视分析系统 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30 (1): 68-78.
- [6] BUTT R A, ANWAR M Y, ASHRAF M W, et al. A novel scheduling and polling mechanism for upstream bandwidth assignment in a passive optical network [J]. Technical Journal of University of Engineering & Technology Taxi, 2018, 23 (1): 58-69.
- [7] AHMED R E, KHALIQ A. On the role of base station in fault-tolerant mobile networks [C] //Conference on Electrical & Computer Engineering, IEEE, 2004.
- [8] AGYEMAN M O, VIEN Q T, AHMADINIA A, et al. A resilient 2-D waveguide communication fabric for hybrid wired wireless NoC design [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2017, 28 (2): 359-373.
- [9] 崔恒源, 黎福海, 姚雪芬. 移动通信基站动力环境监控系统设计及实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (10): 1955-1957, 1961.

- [10] NATARAJAN P, EKIZ N, AMER P, et al. Concurrent multipath transfer during path failure [J]. *Computer Communications*, 2009, 32 (15): 1577-1587.
- [11] 欧阳一鸣, 贾博远, 李建华, 等. WiNoC 中无线通信拥塞与故障感知的容错路由算法 [J]. *电子学报*, 2020, 48 (4): 662-669.
- [12] YANG D, MISRA S, XUE G. Joint base station placement and fault-tolerant routing in wireless sensor networks [C] // *Global Telecommunications Conference, IEEE*, 2009.
- [13] 吴光耀, 陈建云, 郭熙业, 等. 基于 TDMA 的星间链路时分分配设计与仿真评估 [J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22 (12): 4087-4090.
- [14] 杨奎武, 郭渊博, 郑康锋, 等. 延迟容忍移动传感器网络高效广播数据传输机制 [J]. *北京邮电大学学报*, 2013, 36 (1): 91-95.
- [15] WISCHIK D, RAICIU C, GREENHALGH A, et al. Design, implementation and evaluation of congestion control for multipath TCP [C] // *Proceedings of the 8th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation*. Boston: USENIX NSDI, 2011.
- [16] ABADAL S, MESTRES A, TORRELLAS J, et al. Medium access control in wireless network-on-chip: a context analysis [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56 (6): 172-178.
- [17] HU W H, WANG C, BAGHERZADEH N. Design and analysis of a mesh-based wireless network-on-chip [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2015, 71 (8): 2830-2846.
- [18] CABELLOS-APARICIO, ALBERT, ALARCON, et al. Characterization and modeling of multicast communication in cache-coherent manycore processors [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2016, 51: 68-83.
- [19] 许爱军, 张岳. 支持低延迟通信与容错的计算资源共享环境构建 [J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33 (4): 1352-1356.
- [20] 王勇, 韩学山, 丁颖, 等. 基于马尔科夫链的电力系统运行可靠性快速评估 [J]. *电网技术*, 2013, 37 (2): 405-410.
- [21] 邓鑫洋, 邓勇, 章雅娟, 等. 一种信度马尔科夫模型及应用 [J]. *自动化学报*, 2012, 38 (4): 666-672.
- [22] ALTINEL D, KURT G K. Finite-state markov channel based modeling of rf energy harvesting systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67 (2): 1713-1725.
- [23] TAKEO N, KUNIHARU K, TAMOTSU S. Hidden State-variables and a non-Markoffian formulation of reactor noise [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2012, 13 (12): 708-714.
- [24] 于波, 于东, 孙建伟. 马尔科夫决策过程在多路径冗余传输调度算法中的应用 [J]. *小型微型计算机系统*, 2012, 33 (4): 847-851.
- [25] 杨丽曼, 李运华, 袁海斌. 网络控制系统的时延分析及数据传输技术研究 [J]. *控制与决策*, 2004 (4): 361-366, 382.
- [26] 孙大为, 张广艳, 郑纬民. 大数据流式计算: 关键技术及系统实例 [J]. *软件学报*, 2014, 25 (4): 839-862.
- [27] 张淑华, 李平. 基于组合智能算法的无线网络信道分配机制 [J]. *吉林大学学报 (理学版)*, 2019, 57 (1): 139-144.
- [28] 宋飞, 王博朱, 张宏科, 等. 多路径并行传输中接收缓存阻塞问题的研究 [J]. *电子学报*, 2010, 38 (3): 552-555.
- [29] 李璐璐, 裘雪红, 周端, 等. 片上网络容错技术研究 [J]. *计算机科学*, 2018, 45 (3): 305-310.
- [30] GOUNDAN A, COE E, RAGHAVENDRA C S. Efficient broadcasting in delay tolerant networks [C] // *Global Telecommunications Conference 2008 (GLOBALCOM)*, New Orleans: IEEE Press, 2008: 523-527.
- [31] 金红军. 基于 LTE 技术的战术通信系统研究进展 [J]. *电讯技术*, 2012, 52 (8): 1387-1394.
- ***
- [9] YANG L, LIU N W, ZHANG Z Y, et al. A novel single feed omnidirectional circularly polarized antenna with wide AR bandwidth [J]. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2014, 51: 35-43.
- [10] 魏文元, 宫德明, 陈必森. *天线原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [11] KILGUS C C. Multielement fractional turn helices [J]. *Antennas and Propagation*, 1968 (16): 499-500.
- [12] KILGUS C C. Resonant quadrifilar helix [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1969, 17 (5): 349-351.
- [13] KILGUS C C. Shaped-conical radiation pattern performance of the backfire quadrifilar helix [J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1975, 23 (5): 392-396.
- [14] LEISTEN O P. *Antenna* [P]. USA: US6181297 B1. Jan. 30, 2001.
- [15] WANG Y S, CHUNG S J. Design of a dielectric-loaded quadrifilar helix antenna [C] // *IEEE International workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials*, 2006: 229-232.
- [16] 王家勇, 王昌复, 梁旭文, 等. 低轨道小卫星通信中谐振式四臂螺旋天线的研究 [J]. *电子学报*, 2002, 12: 1865-1566.
- [17] 何凌云. 一种新型宽带宽角四臂螺旋天线 [C] // *2007 年全国天线年会*, 2007: 318-321.
- [18] CHEN Y Y, WONG K L. Low-profile broadband printed quadrifilar helical antenna for broadcasting satellite application [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, 36 (2): 134-136.
- [19] SHARAIHA A, TERRET C, BLOT J P. Printed quadrifilar resonant helix antenna with integrated feeding network [J]. *Electronics Letters*, 1997 33 (4): 256-257.
- [20] ERMUTLU M E. Modified quadrifilar helix antennas for mobile satellite communications [J]. *IEEE-APS Conference: Antennas and Propagation for Wireless Communications*, 1998: 141-144.