

Android 多跳 D2D 通信系统的实现与优化

秦恒加 米志超 董超 彭飞

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要 D2D(device-to-device)通信是一种允许终端用户通过共享小区资源进行直接通信的新技术,数据无需经过基站或核心网络。目前相关的 D2D 通信研究工作多集中于单跳 D2D 通信,而多跳 D2D 通信在系统容量、通信范围、数据转运能力以及能效性能等方面更具优势。首先,基于 Android 手机实现了多跳 D2D 通信系统,该系统利用 OLSR 路由协议管理网络路由;然后,利用 Java 语言开发了 D2D 通信控制应用程序,实现了终端用户间的多跳 D2D 通信;最后,通过提升 Android 手机 Ad-Hoc 模式无线功率的方法优化了系统的网络覆盖范围、链路质量等重要性能。

关键词 安卓手机,通信系统,最优化链路状态路由协议,D2D

中图分类号 TN919.72 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.020

Realization and Optimization of Multi-hop D2D Communications System Based on Android Platform

QIN Heng-jia MI Zhi-chao DONG Chao PENG Fei

(College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract Device-to-Device (D2D) communication is a new communication technique which is defined as communications between mobile users directly without traversing the base station (BS) or core network by sharing small cell resources. Currently, most D2D communication studies are focused on single-hop D2D. Compared to single-hop D2D, multi-hop D2D has advantages in system capacity, communication coverage, data offloading, and energy efficiency, etc. The paper realized multi-hop D2D communication system based on Android smartphones. Optimized link state routing (OLSR) protocol is responsible for network management and a developed application is provided to users to control D2D communication program. Users can realize multihop D2D communication with the system. In addition, the paper increased the power of wireless signal to optimize important performances of the system, such as communication coverage and network link quality.

Keywords Android smartphone, Communication system, OLSR protocol, Device-to-Device

1 引言

蜂窝网络通信已经演进到以移动数据、移动计算及移动多媒体为代表的第4代(4G)无线宽带系统。随着智能手机、平板电脑等移动智能无线设备的迅速普及,以及社交网络、视频点播与在线直播等业务的广泛应用,蜂窝网络流量每年递增比率达到92%,远远超过网络容量的增长速度^[1]。这一情况导致网络资源与用户需求之间的矛盾越来越大。因此,5G网络受到了工业界与学术界的广泛关注。在面向5G网络的发展中,一方面,传统的无线通信性能指标(网络容量、频谱效率、能效性能等)需要持续提升从而进一步提高有限且日益紧张的无线频谱利用率;另一方面,研究人员正致力于开发和应用更丰富的无线通信模式来提升终端用户的体验,扩展传统的蜂窝网络通信模式。而D2D^[2]通信正是这样一种新型的

无线网络通信模式。图1所示为D2D通信实例,它允许终端用户通过共享小区资源进行直接通信,数据无需经过基站或核心网络。

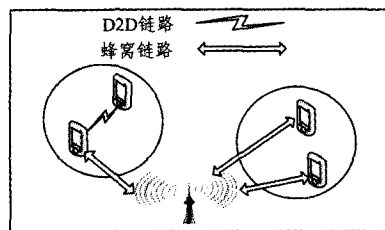


图1 D2D通信实例

在传统的蜂窝网络中,即使设备间处于D2D的通信范围内,用户也必须经过基站进行通信。而D2D通信即使是在无基站等基础设施的情况下,用户间也能够进行通信,部署更加灵

到稿日期:2016-01-08 返修日期:2016-04-01 本文受国家自然科学基金(61472445, 61371124, 61571463),江苏省自然科学基金(BK20140076)资助。

秦恒加(1992—),男,硕士生,主要研究方向为计算机网络、无线通信;米志超(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线网络优化、卫星导航系统组网;董超(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络、无线通信;彭飞(1992—),女,硕士生,主要研究方向为Android信息安全。

活。另一方面,与传统的蜂窝网络通信模式相比,D2D 通信具备许多蜂窝网络通信无法实现的技术优势,它能够提升用户体验,扩展蜂窝网络通信模式,提高系统容量以及提升能效性能^[3-4]。

目前 D2D 的相关研究工作中,移动用户间所组建的无线网络多集中于单跳网络^[5]。这种单跳的 D2D 网络更易实现、简单且更易管理。但是它也存在许多局限性,比如:在地震等自然灾害中,基站等基础设施往往受损严重,而单跳的 D2D 通信模式传输距离十分有限,被困人员无法有效地将受灾区域的消息传递至非受灾区域,从而无法有效地将自身的被困情况通知给救援人员,救援工作无法得到良好的通信保障;在车载网络中,单跳 D2D 通信模式的有效通信范围以及驾驶员所能获取的关于道路、车辆等情况的提前警示范围也受到很大的限制;另外,由于时延的原因,单跳 D2D 通信无法满足多用户的实时服务;而在转运(offloading)蜂窝网络流量的能力上,单跳 D2D 通信也有待提升。

相比于单跳 D2D 网络,多跳 D2D 网络在网络系统容量、网络通信范围以及网络流量转运能力等方面更具优势,具有很高的研究与应用价值。D2D 通信具有广泛的应用场景,但是在许多应用场景中,多跳 D2D 通信具有更良好的性能表现。图 2 描述了这些应用场景,包括应急通信、社交应用、蜂窝网络数据流量转运、多人游戏以及内容共享等。在应急通信场景中,受灾人员可以利用多跳 D2D 通信将灾情有效传递至非受灾区域,以此获取救助。在社交应用中,利用多跳 D2D 通信可以组建多人社交群,进行多人社交或多人游戏等活动,多跳 D2D 通信可以更有效地进行内容共享。在蜂窝网络流量转运中,多跳 D2D 通信可以转运更多的蜂窝网络流量。另一方面,多跳 D2D 通信可以扩大车载网络驾驶员间的有效通信范围,为驾驶员提供更有效的信息。

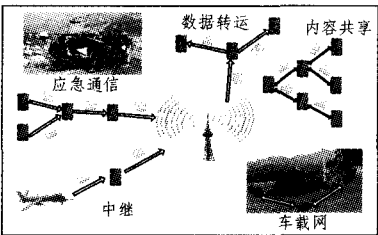


图 2 多跳 D2D 通信的典型应用

本文利用 Android 手机实现了终端用户间的多跳 D2D 通信系统,并借助功率提升的方法优化了多跳 D2D 的覆盖范围、链路质量等性能,同时可以为多跳 D2D 通信的相关研究提供支持。本文第 2 节介绍本系统的整体设计架构;第 3 节描述系统的具体实现细节;第 4 节描述系统存在的不足之处以及优化方法、优化结果;第 5 节在真实场景中利用实验验证系统的有效性;最后总结全文并展望未来工作。

2 系统设计

要在 Android 手机上实现终端用户间的多跳 D2D 通信系统,需要设计合理的系统架构。图 3 所示为所提系统的系统总体设计,包括设备层、网络层、传输层以及应用层。

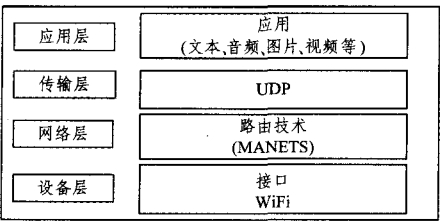


图 3 系统总体设计

2.1 设备层

随着无线技术的快速发展,目前大多数 Android 手机都具备多种无线接口,例如,除了已经被广泛应用的无线协议(例如:WiFi、蓝牙)之外,LTE-A 以及 WiGig^[6]等技术也正迅速发展。表 1 总结了几种重要的无线协议的性能指标,包括:频率带宽、传输距离、最大传输速率以及 D2D 链路的可控制方式。通过表 1 可以看出,不同无线协议的性能表现的差异性十分明显,各有优缺点。为了提高多跳 D2D 通信系统的有效性,必须选取合适的无线网络接口。

表 1 无线协议性能参数

协议	蓝牙	WiFi	LTE-A	WiGig
频率带宽	2.4GHz	2.4~5GHz	700~800GHz	60GHz
传输距离	10m	80m	3~30km	10m
传输速率	24Mb/s	600Mb/s	1Gb/s	7Gb/s
D2D 控制	可自治	可自治	基站	可自治

LTE-A 不同于其他几种技术,它由网络运营商集中控制。在 LTE-A 的标准中,D2D 通信链路由蜂窝网络基站进行控制管理。LTE-A 技术的优势在于能够保证网络覆盖范围内的 D2D 链路具有较好的链路质量,但是其缺陷在于要使用 LTE-A 技术,则必须保证蜂窝网络基础设施可用,部署比较困难,灵活性较差,不适用于应急通信等基础设施受损的应用场景中。WiGig 技术组建的 D2D 通信链路可以不由网络运营商来管理,即在基础设施不可用的情况下用户间也能够进行 D2D 通信,而且其最高传输速率可以达到 7Gb/s。但其缺陷在于数据的有效传输距离只能能够达到 10m 左右,网络覆盖范围十分有限。WiFi 技术组建的 D2D 通信链路可以不由网络运营商来管理,其有效数据传输距离相比 WiGig 以及蓝牙也具有明显的优势,而且 WiFi 的数据传输速率也能够满足普通终端用户的需求。本文系统的目的在于在无基础设施的条件下也能够实现用户间的多跳 D2D 通信,具备更广的网络通信范围,适用于更广阔的应用场景。因此,本系统在设备层上选用 WiFi 技术。

2.2 网络层

多跳 D2D 通信系统也是一种移动自组织网络,传统的移动自组网路由技术工作于网络层。在多跳无线网络通信中,路由技术至关重要。网络中的节点根据路由算法所建立的端到端路径向目的节点发送数据。不同的网络协议对多跳无线通信的性能有很大的影响。因此,系统需要选取有效的路由协议来管理网络。

最优化链路状态路由^[7](OLSR)协议是为移动自组网开发的表格驱动的主动式路由协议,它利用 3 种技术来优化网络开销:1)多点中继技术(MPR),只有 MPR 节点可以转发洪泛过程中的广播消息,而不是每个节点都重传其第一次接受

到的消息,可以有效降低消息开销;2)只有 MPR 节点可以产生链路状态消息,这样可以有效减少网络中的控制消息数量;3)MPR 节点可以选择只报告它自身以及它的中继节点选择器间的链路状态。与经典的链路状态算法相比,OLSR 协议的局部链路状态信息分布在网络中。OLSR 正是利用这些局部信息进行路由计算,如果以路由跳数作为衡量指标,那么 OLSR 可以为网络中的节点提供最佳的路由。本系统选用 OLSR 协议来管理网络。

2.3 传输层

UDP 协议是 TCP/IP 协议栈中重要的传输层协议,它可以运行于 Android 手机的用户空间,为应用程序提供一种无需建立连接就可以发送封装的数据包的方法。而在 OLSR 协议中所有相关的数据均使用统一的数据包格式,这样有利于协议的可扩展性,相关的数据包均被封装在 UDP 的数据包中。互联网地址编码分配机构(IANA)已经将端口 698 分配给 OLSR 协议专门使用。

2.4 应用层

Android 的应用层可以为终端用户提供有效的第三方应用程序,这些应用程序一般由 Java 语言进行开发,可运行于虚拟机以及真实的手机平台。在本系统中,需要开发可运行于应用层的 D2D 通信控制应用程序。终端用户可以通过 D2D 通信控制应用程序实现对 D2D 通信程序的控制,完成设备配置、邻居发现、网络加入以及多跳 D2D 数据通信等相关操作。

3 系统实现

系统的具体实现过程主要包括获取 Android 系统的 Ad-Hoc 模式支持、OLSR 路由协议应用以及 D2D 通信控制应用程序开发等重要部分。

3.1 模式支持

在 IEEE 802.11 无线局域网中存在多种服务集模式。其中,基本服务集模式是最常用的标准模式之一,设备间的连接均由中央控制器(接入点)进行控制管理,网络拓扑成星型。另一个常用标准模式为独立基本服务集模式,即 Ad-Hoc 模式。在 Ad-Hoc 模式中,设备的连接由设备本身进行控制管理,网络中无中央控制器。在这种模式下,设备间可以构建多跳 D2D 网络,而且网络中所有设备节点都能够选取最佳的路径到达目的节点,不需要集中式的路由算法。然而,在最初设计时 Android 设备就只能通过一台中央计算机或路由器进行连接和数据交换,其提供的应用程序接口并不支持 Ad-Hoc 网络模式。但是从内核层次上来看,Android 是由 Linux 内核进行第二次开发而成,因此利用有效的方法可以获取系统对 Ad-Hoc 模式的支持。

不同的 Android 设备间的内核存在差异,大部分 Android 设备只是未开放 Ad-Hoc 模式功能,但是也存在一些特殊的 Android 设备,这些设备的应用架构与系统内核均不支持 Ad-Hoc 模式。为确保系统的适用性,本系统使用了多种品牌的手机,对于未开放 Ad-Hoc 模式的 Android 手机(ZTE V5 等),本系统使用 iw 工具将设备转换为 Ad-Hoc 模式,从而构

建多跳 D2D 网络。iw 工具是 Linux 无线扩展的用户层配置工具之一,它可以对设备的无线网卡的大部分参数进行配置。而对于应用架构与系统内核均不支持 Ad-Hoc 模式的 Android 手机(coolpad 8720 等),通过研究发现,必须对系统的内核进行操作。对于这种 Android 设备,本系统研究了其驱动的源码并通过调整源码来获取 Ad-Hoc 模式支持。调整的详细规则如下:

```
+++ b/drivers/net/wireless/bcm43xx/wl_cfg80211.c
-BIT(NL80211_IFTYPE_STATION)
+ BIT(NL80211_IFTYPE_STATION) |
  BIT(NL80211_IFTYPE_ADHOC)
```

以上两种操作方法都需要用户以 root 身份登录手机来执行,否则用户不具备系统的操作权限,以致无法获取 Android 手机的 Ad-Hoc 模式支持。

3.2 路由应用

系统如何有效地将 OLSR 协议应用于 Android 设备是实现多跳 D2D 通信系统的另一难点。目前一些比较流行的 OLSR 协议实现版本包括 olrs.org OLSR daemon, OOLSR, Qolsr 以及 NRLolsr。几种版本的实现语言、可支持协议以及可支持的操作系统等重要指标均有差异,表 2 总结了几种版本的重要指标。

表 2 不同 OLSR 协议实现版本的重要指标

版本	语言	IPV4	IPV6	可支持系统
OOLSR	C++	可支持	可支持	Linux, Windows
Qolsr	C++	可支持	可支持	Linux
NRLolsr	C	可支持	可支持	Linux, Windows
Olrs.org	C	可支持	可支持	Linux, Windows 等

其中,olrs.org OLSR daemon 由 Unik 大学利用 C 语言编写实现,它实现了 OLSR 协议的全部功能。olrs.org OLSR daemon 具备易获取、易扩展、易应用于其他平台的优点,具有灵活的插件结构,支持使用可加载的插件,这些插件可用于处理和产生特定的数据包类型或其他指定功能。它支持链路质量的选择性扩展,支持 IPv4 和 IPv6 的编址方案,可应用于 Linux, Windows, VxWorks 等多种操作系统。它也是当前最流行的 OLSR 协议实现版本,目前关于 OLSR 协议的测试多使用该版本。因此,本系统采用 olrs.org OLSR daemon 来实现 OLSR 路由协议的应用。

由于 olrs.org OLSR daemon 由 C 语言编写实现,为了将其应用于 Android 平台,需要使用 NDK 工具来对 olrs.org OLSR daemon 进行操作。NDK^[8]是重要的 Android 开发工具,它提供了一系列的工具,帮助开发者快速开发 C(C++)的动态库。同时 NDK 集成了交叉编译器,并提供了相应的 mk 文件来隔离 CPU、平台、ABI 等差异。将 OLSR 协议应用于 Android 平台的传统方法是利用 NDK 工具编译 olrs.org OLSR daemon,生成 Android 版本的二进制可执行程序,然后将二进制可执行程序移植到 Android 设备后,在 Linux 系统的终端中调试 Android 设备,实现 OLSR 路由协议应用。传统方法简便易行,但是对于终端用户而言,这种方法十分不方便,需要终端用户将 Android 设备外接 Linux 系统进行调试,不利于多跳 D2D 系统的实际应用。因此,本系统将二进制可

执行程序移植到应用程序中,利用应用程序控制 D2D 通信。本系统所使用的方法更加简单有效,简化了终端用户的操作,极大地提升了多跳 D2D 通信的实际应用性。本系统将 OLSR 协议应用于 Android 平台的流程如图 4 所示。

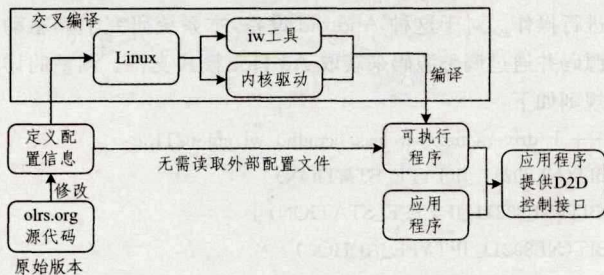


图 4 系统 OLSR 协议应用实现流程

(1)调整 olsr.org 源代码。传统方法中,路由协议触发时需要读取相应的配置文件,否则无法启用 OLSR 协议。本系统将外部配置文件信息在源码中进行定义,无需额外的配置文件以及配置信息读取操作。

(2)在 ubuntu 或 fedora 等 Linux 操作系统平台上利用 NDK 工具以及相应的命令将 olsr.org OLSR daemon 编译成可在 Android 平台上执行的名称为“olsr”的二进制可执行程序。

(3)将二进制可执行程序移植到所开发的 D2D 通信控制应用程序中,由应用程序控制管理二进制可执行程序。

(4)当用户触发 Android 平台上的 D2D 通信控制应用程序时,应用程序将对二进制可执行程序进行操作,实现 OLSR 协议的应用。

3.3 应用程序

图 5 所示为本系统所开发的 D2D 通信控制应用程序。该应用程序由 Java 语言开发,其核心功能在于为用户提供控制 D2D 通信程序的接口。用户首先在配置界面(如图 5(a)所示)完成本机的 IP 地址以及 essid 号的配置工作,然后在启用界面(如图 5(b)所示)点击“确定”按钮,确认开启 D2D 通信控制程序。应用程序在接收到用户的“确定”触发事件后将开启 D2D 通信程序。Android 系统是一种基于权限控制的操作系统,当用户将手机进行 root 后,设备的 root 权限管理权将移交给终端用户。在 Android 平台上用户需要以 root 身份登录才有足够的权限来执行由 olsr.org OLSR daemon 编译后生成的二进制可执行程序。在应用程序的代码中有相关的请求用户授予其 root 权限的代码。在执行二进制可执行程序前,应用程序需要向用户发出申请,请求授予其 root 权限。



图 5 D2D 通信控制应用程序

应用程序启用 D2D 通信程序的流程如图 6 所示,其中的核心步骤包括:

(1)首先进行拷贝操作,将移植在应用程序中的二进制可执行程序“olsr”拷贝至 Android 手机 SD 卡中的 /data 下的指定存储目录。

/data 目录是 Android 的根目录,只有 Android 系统具有操作权限。应用程序在运行时如果需要在手机上保存数据,需要在根目录下创建一个文件夹,然后把数据保存在该文件夹中。本系统需要应用程序运行一个移植的二进制可执行程序,利用“先拷贝,后执行”的方法。首先将可执行程序拷贝至根目录中,并将“此目录在应用程序中”告知给系统,然后让系统在根目录的指定目录中对可执行程序进行操作。

(2)D2D 通信控制应用程序向系统请求 root 权限。用户需要将 root 权限授予给应用程序,在申请授权时,本系统开发的应用程序会给用户 3 种选择,图 6 显示了应用程序申请授权时的选择项:在授予 root 权限时,用户可选择将 root 权限永久授予给应用程序,也可以选择将 root 权限临时授予给应用程序。如果选择永久授权,则应用程序在下次启用 D2D 通信程序时将不再进行 root 权限申请,直接启用 D2D 通信程序;如果选择“仅本次授权”,则应用程序在下次启用 D2D 通信程序时仍需申请 root 权限;如果选择“记住 10 分钟”,则在 D2D 通信程序运行 10 分钟后将再次向用户申请 root 权限。

(3)应用程序通过执行命令来执行 SD 卡中指定目录下的二进制可执行程序,启动 D2D 通信。

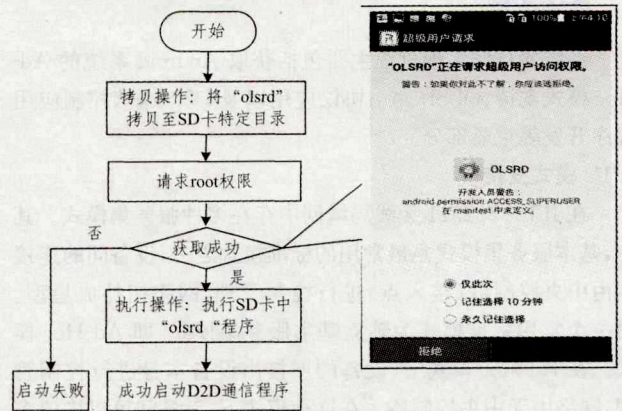


图 6 应用程序启用 D2D 通信程序流程图

4 系统优化

4.1 系统不足

在进行系统测试的过程中,发现在 Ad-Hoc 模式下随着网络内节点间通信距离的增加,网络链路质量会出现十分剧烈的抖动,网络丢包率会随着通信距离的增加而快速上升,且在最大通信范围距离处,还存在网络链路断开后设备无法再次有效入网的问题。而在传统的 AP 模式下,在无干扰情况下的无线链路质量抖动并不会十分剧烈。WiFi 分析仪是一种常用的 WiFi 信号分析工具,它可以分析并显示设备周围的 WiFi 信道使用情况以及不同 WiFi 信号的信号类型、信号强度值。考虑到模式的差异性以及 Android 手机功率的自适应

性设置,利用 WiFi 分析仪分别测试系统版本、系统设置等均相同的同款 ZTE V5 手机在 Ad-Hoc 模式下与 AP 模式下不同时刻的 WiFi 信号强度值,测试结果如图 7 所示。信号强度受到多种因素的干扰,因此并不是固定不变的,而是处于波动的状态。在测试期间内,Ad-Hoc 模式下的无线信号强度平均值为-35dBm,而 AP 模式的无线信号强度为-32dBm。从无线信号强度的平均值来看,Ad-Hoc 模式下的无线信号强度要比 AP 模式小 3dBm 左右。此外,虽然两种模式下的信号强度都存在抖动的情况,但是 AP 模式的信号强度相比于 Ad Hoc 更加平稳。Ad-Hoc 模式下手机较低的无线功率导致设备间的单跳通信传输距离小于 AP 模式,经过实际测试,Ad-Hoc 模式下设备间的单跳通信距离为 60m 左右。

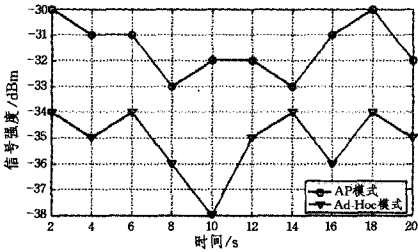


图 7 Ad-Hoc 模式与 AP 模式下的功率对比

4.2 系统优化

Android 手机在 Ad-Hoc 模式下的无线功率设置限制导致 D2D 通信的网络覆盖范围较小,提高手机的无线功率是可行的优化方法。build.prop 文件是 Android 系统中的系统注册表文件。它定义了 Android 系统初始化的参数属性以及相关的功能开放特性。本文通过增加 build.prop 文件中相关参数的方法,改进了 Android 手机无线功率的性能。增加的参数细节如下:

net.tcp.buffersize.default=4096,87380,256960,4096,16384,256960

net.tcp.buffersize.wifi=4096,87380,256960,4096,16384,256960

net.tcp.buffersize.gprs=4096,87380,256960,4096,16384,256960

net.tcp.buffersize.edge=4096,87380,256960,4096,16384,256960

增加以上参数可以提高手机原始的参数设置值,增强无线功率。在增强手机无线功率后,同样利用 WiFi 分析仪同时观测系统版本、系统设置等均相同的同款 ZTE V5 手机在 Ad-Hoc 模式下原始功率与增强功率的无线信号强度。图 8 所示为不同时刻两种模式的无线信号强度值,其中在测试期间增强功率后无线信号强度的平均值为-32dBm,而原始功率的无线信号强度的平均值为-34dBm。经多次实验取平均值,实验结果表明,经过功率增强后的 Android 手机在 Ad-Hoc 模式下无线功率平均可增加 2~3dBm 左右。相比于原始功率下无线信号强度,功率增强后的无线信号波动更加平稳。通过实际测试,单跳设备间的通信距离可增加至 80m 左右,有效扩展了系统的网络覆盖范围。

另一方面,无线功率增强后网络链路质量能达到一种更

好的状态。OLSR 路由协议使用期望传输次数(ETX)作为链路质量的衡量指标。以 p 表示端到端的数据丢包率,则 ETX 与丢包率的关系为: $p=1-\frac{1}{ETX}$ 。通过实际测量可以获取不同通信距离条件下 OLSR 协议的 ETX 的值,转换后可以获取网络的链路质量情况。图 9 所示为原始功率和功率增强后两种不同无线功率下的网络链路质量情况。以丢包率为衡量指标,可以看出功率增强后的系统网络链路质量明显优于原始功率的系统状态。虽然增强无线功率会使电源增加一定的耗电量,但是可以为用户提供更高的网络通信链路质量以及更大的网络覆盖范围。

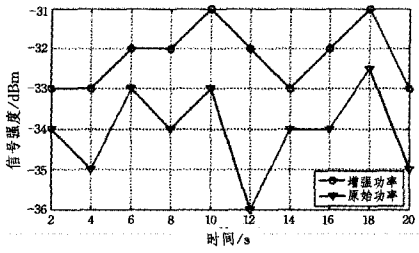


图 8 增强功率与原始功率下的信号强度对比

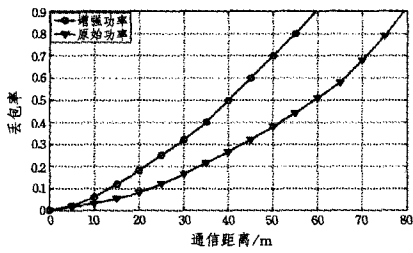


图 9 增强功率与原始功率下的网络链路质量对比

5 实验结果

系统利用 4 台 Android 手机组建多跳 D2D 通信网络。为了保证系统的适用性,本系统采用多种品牌的 Android 手机,包括:1 台 coolpad 8720、1 台 HUAWEI mate 以及 2 台 ZTE V5。

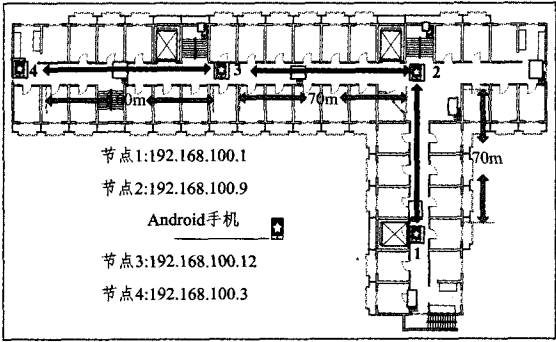


图 10 系统实验场景

实验场景如图 10 所示,在实验室大楼的 T 字型走廊内均匀分布 4 个 Android 手机节点,节点间距离均为 60~70m。每个手机配置一个静态 IP 地址,且所有的手机具有相同的网段和 essid 号。实验通过“route”命令查看各节点的核心路由

- MOD. Chicago, USA, 2006; 375-380.
- [4] LI Z J, LI M, WANG J L, et al. Ubiquitous data collection for mobile users in wireless sensor networks[C]//Proc of the IEEE INFOCOM. Shanghai, China, 2011; 2246-2254.
- [5] LUO J, ZHANG Q, WANG D. Delay tolerant event collection for underground coal mine using mobile sinks[C]//Proc of the IEEE IWQoS. Charleston, USA, 2009; 1-9.
- [6] HUI X W, LIU Y M. Comprehensive Study on the Problem of Mobile Sink Path Planning and the Cluster Head Node Selecting in WSN Data Collection[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(1): 118-122. (in Chinese)
惠晓威, 刘彦每. WSN 数据集中移动 Sink 的路径规划和簇头节点选取问题的综合研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(1): 118-122.
- [7] ZHANG L, ZHANG K. Mobile Sink-Based Data Gathering Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(5): 673-677. (in Chinese)
张蕾, 张堃. 无线传感器网络中一种基于移动 sink 的数据收集算法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(5): 673-677.
- [8] MA M, YANG Y Y. SenCar: an energy-efficient data gathering mechanism for large-scale multihop sensor networks[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(10): 1476-1488.
- [9] ZHOU T, GAO M F. Optimal path selection for mobile sink in dense wireless sensor networks[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(4): 1120-1122. (in Chinese)
周涛, 高美凤. 密集型传感器网络中移动 sink 的路径选择机制[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(4): 1120-1122.
- [10] SOMASUNDARA A A, KANSAL A, JEA D. Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(8): 958-973.
- [11] ZHANG X W, SHEN L, JIANG Y F, et al. Optimizing path selection of mobile Sink nodes in mobility-assistant WSN[J]. Journal on Communications, 2013, 34(2): 85-93. (in Chinese)
张希伟, 沈琳, 蒋益峰, 等. 移动协助传感器网络中 Sink 的路径优化策略[J]. 通信学报, 2013, 34(2): 85-93.
- [12] LEE H, WICKE M, KUSY B, et al. Data stashing: Energy-efficient information delivery to mobile sinks through trajectory prediction[C]//Proc. ACM IPSN. 2010; 291-302.
- [13] ZHAO M, YANG Y. Bounded relay hop mobile data gathering in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans. Comput., 2012, 61(2): 265-277.

(上接第 139 页)

表,用“ping”命令检查各节点的连通性。任意选取网络中的两个节点,例如:以节点 1 作为源节点,以节点 4 作为目的节点,两个设备节点间的最大路由跳数为 3。

```
*****ROUTING TABLES*****
DESTINATION  NEXT HOP    HOPS
192.168.100.9  192.168.100.9  1
192.168.100.12 192.168.100.9  2
192.168.100.3  192.168.100.9  3
*****
```

图 11 节点 1 路由表信息

图 11 所示为节点 1 的路由表项信息,由路由表信息可以看出,节点 1 能够正确进行邻居发现并与不同通信距离的邻居建立有效路由。另一方面,通过“ping”可以实现节点 1 与节点 4 的互联互通。经过多次实验验证,系统可以实现网络覆盖范围内任意两个节点的互联互通,使用本系统可以实现用户间的多跳 D2D 通信。

结束语 多跳 D2D 通信具有十分重要的理论与实际应用价值。本文在 Android 手机上通过 Ad-Hoc 模式支持获取、OLSR 路由协议应用实现了多跳 D2D 通信系统,同时为用户提供了控制接口,优化了系统的不足之处,并通过实验验证了本系统的实用性,这是多跳 D2D 研究工作的重要补充。目前关于多跳 D2D 通信的理论研究工作还很少,而且理论研究成果大都没有利用实际的平台进行验证,许多关于多跳 D2D 通信的理论工作有待完善。下一步将本系统作为多跳 D2D 通信研究工作的重要平台,进行多跳 D2D 通信的理论研究工作并将研究成果在本平台上给予实际验证,为 D2D 通信的实际应用提供更真实有效的参考。

参 考 文 献

- [1] Cisco Visual Networking Index: Global mobile data traffic forecast update, 2013-2018[OL]. http://scisweb.ulster.ac.uk/~jose/COM555/Useful%20Reading%20and%20References/Cisco_white_paper.pdf.
- [2] WANG J Y, GONG Z S, FU J L, et al. Data sharing scheme based on multi-hop Device-to-Device (D2D) forwarding[J]. Computer Science, 2015, 42(8): 124-127. (in Chinese)
王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. 基于多跳 D2D 转发的簇内数据共享方案[J]. 计算机科学, 2015, 42(8): 124-127.
- [3] DOPPLER B, RINNE M, WIJTING C, et al. Device-to-device communications as an underlay to LTE-advanced networks[J]. IEEE Communications, 2009, 47(12): 42-49.
- [4] WEI L, HU R, QIAN Y. Enable device-to-device communications underlaying cellular networks: challenges and research aspects[J]. IEEE Communications, 2014, 52(6): 90-96.
- [5] LIU J J, NEI K, KADOWAKI, et al. Device-to-Device communications in LTE-Advanced networks: a survey[J]. Communications Surveys, 2015, 17(4): 1923-1940.
- [6] HASEN, CHRISTOPHER J. WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(6): 6-7.
- [7] JACQUET P, CLAUSEN T, LAOYITI A, et al. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks[C]//International Conference on Multi Topic 2001. Paris: IEEE Press. 2001: 62-68.
- [8] ZHAO H W. Android NDK platform build and application[J]. Journal of Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(35): 10055-10057. (in Chinese)
赵宏伟. Android NDK 开发环境实现与应用[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(35): 10055-10057.