

文章编号: 1000-5862(2018)02-0149-06

基于 nRF2401 的多用户跳频双工通信方式的设计

武 奇 彭 霞,刘淑琴* 骆兴芳

(江西师范大学物理与通信电子学院 江西 南昌 330022)

摘要: 为解决工作于 ISM(工业、科学、医学)频段的 nRF2401 芯片同频干扰和透明传输保密性低,实现 nRF2401 芯片的多用户双工组网通信的问题,设计了一种跳频通信方案.采用跳频(FHSS)、时分双工(TDD)以及跳频码分多址(FH-CDMA)技术,实现了基于 nRF2401 的多用户跳频双工组网通信. Matlab 仿真测试了该设计的跳频双工通信系统的各项主要性能,实验结果表明:各主要性能良好,较好地解决了使用 nRF2401 进行无线传输的缺陷,达到了预期效果.

关键词: 跳频; 时分双工; 码分多址

中图分类号: TN 925 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2018.02.06

0 引言

目前广泛使用的短距离无线传输标准有 nRF24XX、Bluetooth、WiFi、ZigBee、UWB 等,其中由 Nordic 公司生产的 nRF24XX 系列射频芯片具有价格低廉、操作简单、外设器件少、传输速率高、支持多点通信、低功耗、易于开发等诸多优点而被广泛采用^[1].

nRF24L01 是一款工作在 2.4~2.5 GHz 世界通用 ISM 频段的单片无线收发器芯片^[2],采用 GFSK 调制方式,有自动应答、自动重发和 CRC 检验功能,具有较高的传输速率(1 或 2 Mbps)^[3].但由于工作在 2.4 GHz 的 ISM(工业、科学、医学)频段,因使用 ISM 频段无需申请许可,故许多射频器件工作在此频段内,造成 2.4 GHz 频段内过于嘈杂,同频干扰严重;且使用透明窄带传输,造成 nRF2401 传输的质量和保密性均无法得到有效保障.孙保群^[4]提出采用自适应变频技术躲避同频干扰,而自适应变频技术的实质还是定频通信,故无法有效解决 nRF2401 透明窄带传输保密性低的问题,而且遇到宽带干扰时无法正常通信.

跳频通信技术是目前通信抗干扰的重要技术手段,在军事和民用通信均得到了广泛应用^[5].跳频通信系统可通过提高跳频速率、增加跳频带宽(可用频点)等增效措施来提高抗干扰能力.为解决上述 nRF2401 通信存在的问题,考虑到 nRF2401 在工

作频段内有 125 个可选工作频道且频道切换时间短^[6],满足了跳频通信快速切换频率和多频点的要求.故本文拟设计一种多用户跳频双工通信协议,采用跳频技术(FHSS)达到解决同频干扰和提高传输保密性的目的,用正交的跳频序列来区分同时通信的不同用户即跳频码分多址(FH-CDMA)技术,采用时分双工(TDD)技术实现双工通信,从而根本解决采用 nRF2401 芯片通信时的上述问题.

1 设计方案

1.1 跳频序列的设计

1.1.1 跳频序列类型选择 跳频通信系统是使载波在伪随机序列的控制下不断变化^[7],其核心之一是跳频序列的设计,其性能对跳频系统具有较大影响,因此设计出具有良好性能的跳频序列是跳频通信研究的重要内容之一.由于跳频通信协议要实现 FH-CDMA,所以跳频序列应满足优良的汉明相关性、良好的随机性、尽可能多的可用序列数目等特性.目前常用于构造跳频序列的伪随机序列主要有 GOLD 序列、m 序列、M 序列和 RS 序列^[8],其中 RS 序列在跳频组网中有良好的特性,故本文选取 RS 序列作为跳频序列. RS 相比于其他序列具有如下优势: (i) RS 序列是一种近似正交的序列,互相关系数小,可用于跳频码分多址(FH-CDMA); (ii) RS 码是

收稿日期: 2017-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(51461019)资助项目.

通信作者: 刘淑琴(1980-),女,江西高安人,讲师,主要从事电路分析、嵌入式系统的研究. E-mail: suilove84@jxnu.edu.cn

一种最小距离最大码(MDC);(iii) RS 码硬件实现较为简便,所需运算资源较少,故 RS 是一种性能良好的跳频序列^[9].

在伽罗华域 $GF(q)$ 上,若循环码生成的多项式 $g(x)$ 有 $2t$ 个连续幂次的根,则由 $g(x)$ 生成的循环码称作 BCH 码,对任意选取的正整数 m ,可以计算出一个 q 进制的 BCH 码,且其长度为 $n = q^m - 1$. 当 m 取 1 且 $q > 2$ 时,得到的 BCH 码即为 RS 码. 当 $m = 1$ 时, $GF(q^m) = GF(p^r)$,一般在数字系统中取 $p = 2$. 设 $GF(2^r)$ 的本原多项式为 $p(x)$,若 $p(\alpha) = 0$ 则 α 为 $GF(2^r)$ 的本原元. RS 码的主要参数有:码长 $N = 2^r - 1$,码元距离 d 以及信息码元数 $k = N - d + 1$,当确定了这些参数即可构造出 RS 序列.

1.1.2 RS 序列参数选取 RS 码的主要参数是码长 N 和码元距离 d ,由于 nRF2401 具有 125 个频隙,故本方案采用 $r = 7$,即码长 $N = 2^7 - 1 = 127$. 在码元距离选取时考虑到码间距过大会导致 RS 码的编码电路过长,经测试取 $d = 10$ 时性能较为理想,信息码元数 $k = N - d + 1 = 118$. 根据 RS 码的编码规则,码序列的总数为 $2^{k \times r} = 2^{118 \times 7} = 2^{826}$,可满足本跳频系统的需要.

1.1.3 RS 序列的产生方法 通过 Matlab 软件中

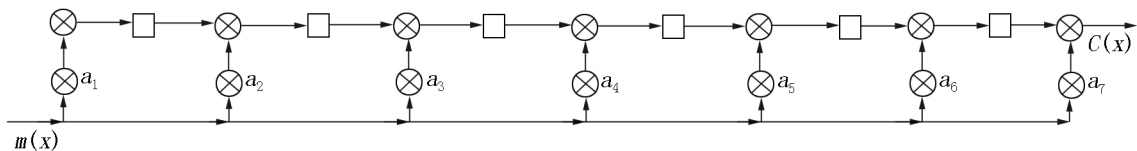


图1 RS 编码器原理图

1.2 跳频同步方式

跳频通信特别是高速跳频通信,其核心难点为发送端和接收端的同步问题^[10],同步包括 2 个部分:(i) 跳频序列(跳频图案)的同步,即主从机所使用的跳频序列要相同;(ii) 时钟同步,即每次起跳的时间点和在每个频隙上驻留的时间要精确相同. 上述同步必须同时保持同步才能实现通信,否则通信双方同一时刻将不在同一频隙上,无法正常通信. 本文设计的跳频系统同步方法流程图如图 2 所示,下面对本文所设计的同步方法作详细说明.

1.2.1 跳频时钟同步 主机采用扫描的方式发现从机,并且同时完成时钟同步,具体方法是:在开机前为每个从机分配一个唯一的地址码,根据该地址码为参数产生的 RS 序列互相正交. 系统开机后,全部 nRF2401 初始化为接收模式并将计时器归零,所有用户通过计时器的秒数作为 RS 序列初始码,并且根据各自分配的地址码作为(5)式参数,通过(6)式产生相互正交的 32 频点跳频序列,计时器每改变

的 rsngenpoly 命令可以得到 $GF(2^7)$ 的本原多项式为

$$P(x) = x^7 + x^3 + 1, \quad (1)$$

RS 码通用生成多项式为

$$g(x) = (x - a)(x - a^2) \cdots (x - a^6). \quad (2)$$

根据上述选取的参数,以及 RS 码通用生成多项式(2),本文的 RS 码生成多项式为

$$g(x) = (x - a)(x - a^2)(x - a^3)(x - a^4)(x - a^5)(x - a^6)(x - a^7). \quad (3)$$

根据本源多项式(1)可求得伽罗华域 $GF(2^7)$ 上所有的本原元素 α ,即 $P(\alpha) = \alpha^7 + \alpha^3 + 1 = 0$ 时的所有根 $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7]$. 根据本源多项式的根可化简 RS 码的生成多项式(2),化简后的结果为

$$g(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 + \cdots + \alpha_6 x^6 + \alpha^7. \quad (4)$$

设 m 为任意整数,则信息源多项式为

$$m(x) = m_0 + m_1 x^1 + m_2 x^2 + \cdots + m_{k-1} x^{k-1}. \quad (5)$$

RS 码的生成公式为

$$C(x) = m(x) g(x), \quad (6)$$

其中 $m(x)$ 为信息源多项式,在本文所设计的跳频通信系统中,信息源为从机发给主机的 RS 初始码, $g(x)$ 为 RS 序列的生成多项式(4). 根据式(6)设计出的 RS 编码器原理图如图 1 所示.

1 s 32 频点的跳频序列改变 1 次,从而完成所有用户的初始化.

所有用户开始等待主机发起通信请求(本文中率先发起通信请求的 nRF2401 为主机,被动接受通信请求的 nRF2401 为从机). 当主机开始进行通信时,先将自身状态修改为发送模式,在 ROM 中查询目的从机的地址码,根据目标从机的地址码产生与目标从机相同的 32 频点跳频序列,并在 32 个频点上依次发送通信请求,从机在上述 32 频点的任意频点监听. 主机循环完 32 周期后,在第 33 ~ 35 周期等待从机应答,从机收到主机初同步信息后,等待主机完成 32 周期的发送,在第 33 ~ 35 周期发送应答信息. 若主机在第 33 ~ 35 周期未收到应答信息,则重新根据计时器秒数信息和目标从机地址码产生 32 频点的跳频序列,并且在 32 频点上依此发送通信请求,重复上述步骤,直到得到从机应答,之后主机向从机发送 2 个同步帧,2 个同步帧之间相差 1 ms,从机以此为基准,校正自己的时钟,第 2 个同步帧发送

完后,主机和从机同时将跳频计数器归零.至此从机

和主机完成了时钟的精准同步.

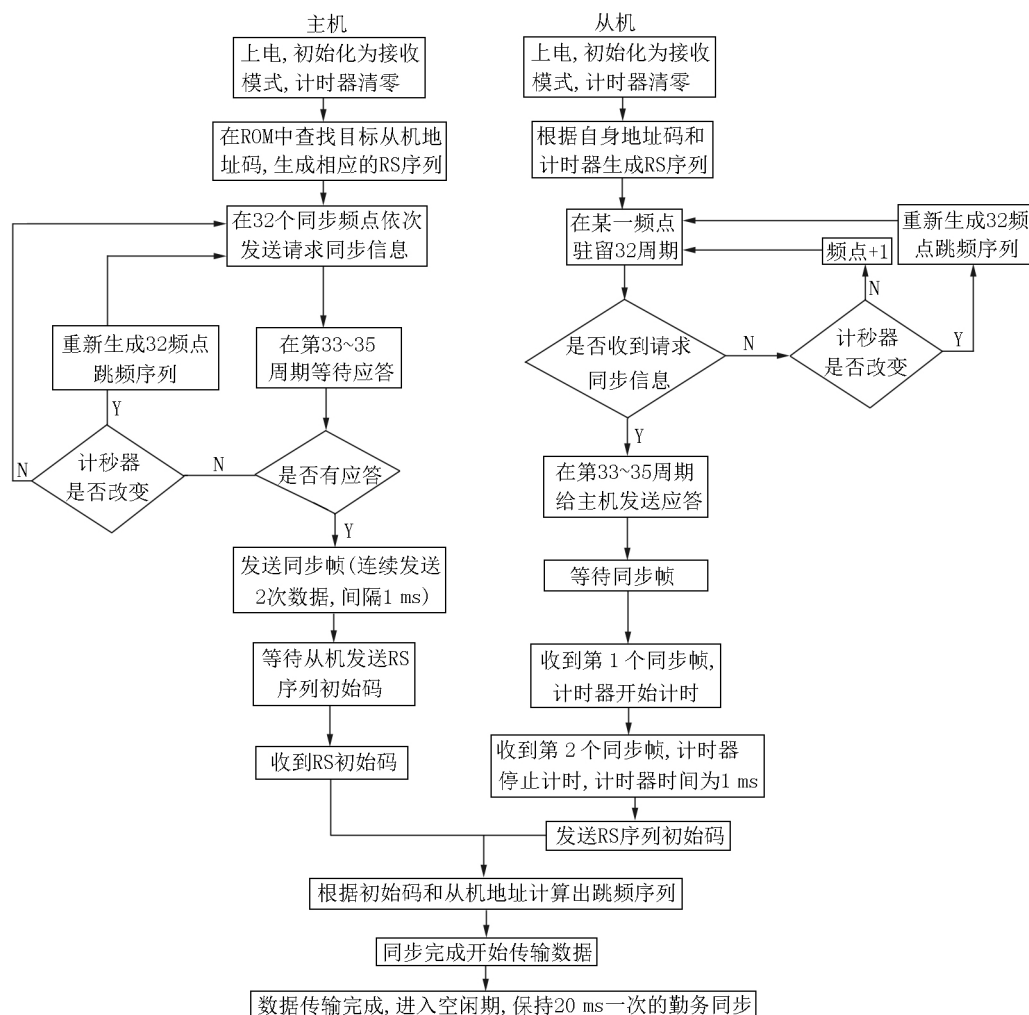


图2 同步方法流程图

1.2.2 跳频序列的同步 完成时钟精准同步后,从机通过自身 TOD 信息,产生 RS 序列初始码,并发送给主机,两者均以此初始码作为生成 RS 序列的初始码,以从机地址码作为(5)式的参数,利用(6)式产生 RS 序列作为跳频序列,实现跳频序列同步。

1.3 跳频码分多址的设计

本文设计的基于 nRF2401 的跳频通信系统需要满足多用户同时通信的要求,要满足在同一时间,多对用户互相通信必须满足以下 2 个条件:(i) 可以区分不同的用户,每个用户必须可以通过一定的方法识别不同的用户,并且能跟目的用户建立通信;(ii) 多组用户通信时不会相互干扰,在同时有多对用户通信时,必须保证不同通信信号之间不会产生相互干扰或相互干扰极小,对正常通信基本无影响。

本文采用跳频码分多址(FH-CDMA)方式达到了上述要求.该技术是一种在军事通信领域常见的通信方式,其原理是选取一组具有正交性的跳频码^[11],为每个用户分配一个跳频码,使得每个用户

使用分配的跳频码控制信号载波在一个宽频带内不断跳变.由于每个用户跳频码是正交的,即各个用户使用的频率在任意时刻都不相同,故跳频码可作为区分不同用户的标志,跟特定用户通信时必须与其跳频码相同,否则将无法通信。

具体设计方案是:每个用户拥有独一无二的地址码,而且还在 ROM 中预先存储了其他用户的地址码,可通过不同的地址码来区分不同的用户,这满足了准确识别不同用户的要求.RS 序列一个重要的性质就是近似的正交性,即通过以不同设备的地址码作为参数所产生的跳频序列具有近似的正交性,而且 RS 序列的自相关和互相关特性都较好,因此只要保证同时通信的每组用户 RS 序列不相同,就可保证同时通信互不干扰.由于不同组用户互相通信时用不同的地址码作为参数产生 RS 序列,保证了不同组用户 RS 序列互不相同,进而保证了同时通信互不影响,满足了多组用户通信时不会相互干扰的要求.故本系统采用 RS 码作为跳频序列,采用

FH-CDMA 实现了用户识别和不同组用户同时通信互不干扰.

1.4 双工传输方式的设计

由于 nRF2401 是半双工传输芯片,且 nRF2401 切换接收和发射状态所需时间短,本文采用时分双工(TDD)的方式实现全双工通信^[12],时分双工(TDD)是一种实现双工通信的方式,用于分离上行链路和下行链路^[13].在每个频隙的前半个时隙主机发送从机接收,后半半个时隙从机发送主机接收,通过不同时间隙来区分上行链路和下行链路,实现了全双工通信.

2 性能分析

2.1 跳频序列的性能分析

跳频序列的优劣直接关系到整个跳频通信系统的性能,本文设计的基于 nRF2401 的跳频通信系统,跳频序列不仅用于控制传输频率,还用于以码分多址的方式区分用户,因此序列各项性能的优劣尤为重要.其中表征跳频序列优劣的 2 个重要参数是汉明自相关系数和汉明互相关系数.

2.1.1 汉明自相关系数 定义周期汉明相关为

$$H_{xy}(\tau) = \sum_{j=0}^{L-1} h(x(j) \bmod(y(j+\tau) L)), (7)$$

$$h(x(j) \bmod(y(j+\tau) L)) = \begin{cases} 1 & x(j) = y(j+\tau) \\ 0 & x(j) \neq y(j+\tau) \end{cases}$$

$H_{xy}(\tau)$ 表示 2 个跳频序列 X 和 Y 在相对时延为 τ 时,在一个序列周期里发生频隙重合的次数 $0 \leq \tau \leq L-1$.显然 $H_{xy}(\tau)$ 越小,2 个跳频序列之间的重合次数就越小,也就是 2 个用户之间的相互干扰就越小.

根据(7)式可得

$$H(X) = \max_{0 \leq \tau < L} \{H_x(\tau)\}, (8)$$

表示汉明自相关系数的最大旁瓣,即序列 X 与其自身平移之间重合次数得最大值,该参数影响系统的同步性能.

2.1.2 汉明互相关系数 定义非周期汉明相关为

$$H_{xy}(\tau) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{L-1-\tau} h(x(j) \bmod(y(j+\tau) L)), & 0 \leq \tau \leq L-1, \\ \sum_{j=|\tau|}^{L-1} h(x(j) \bmod(y(j+\tau) L)), & -(L-1) \leq \tau \leq 0, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} (9)$$

由非周期汉明相关的定义可知,非周期汉明相关将所有超过所取序列的长度 L 的相关值都认为是 0.

根据(9)式可得 $H(x, y) = \max_{0 \leq \tau \leq L} \{H_{xy}(\tau)\}$, $H(X, Y)$ 表示汉明互相关的峰值,即序列 X 与序列 Y 在任何时延下重合次数的最大值,该参数影响系统的抗干扰性能和多址组网性能.

在 Matlab 中仿真 RS 序列得到的自相关系数和互相关系数图如图 3 和图 4 所示.

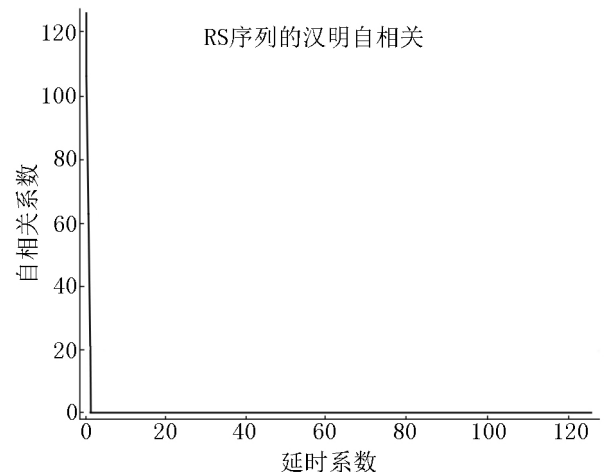


图3 自相关系数

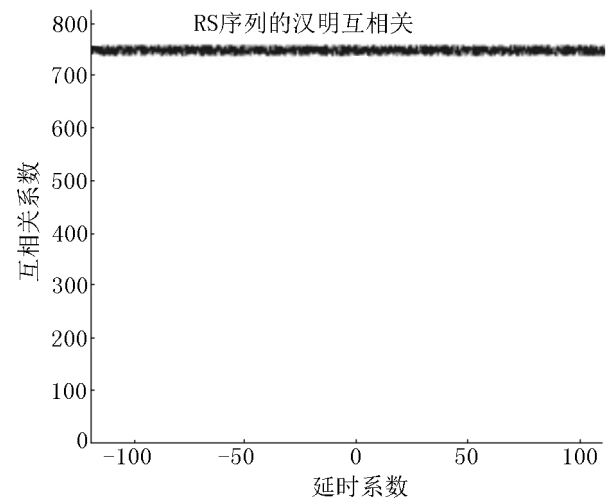


图4 互相关系数

从图 3 和图 4 可以看出,本文设计的跳频序列自相关系数最大旁瓣等于 0.互相关系数小于 800,接近了 RS 序列互相关值的理论极限,且在延迟为 0 时互相关系数为 0.因此具有良好的同步性能和抗干扰能力,且组网通信时碰撞的概率极小^[14]跳频序列性能优异.

2.2 系统综合性能分析

2.2.1 抗窄带干扰性能分析 在 Matlab 软件的 simulink 中对系统进行仿真^[15],分别设置普通的 nRF2401 定频通信系统和由本文设计的跳频通信系统,并对定频系统所用的通信频点释放高斯窄带噪声,对本文设计的跳频通信系统的相同频率也释放高斯窄带噪声,根据 2 个系统的误码率即可得到抗

干扰性能的优劣. 图5是同时设置接收灵敏度为 -16 dBm (根据 nRF2401 数据手册, 其接收灵敏度为 -16 dBm) , 误码率和被干扰后接收端信号功率的关系图.

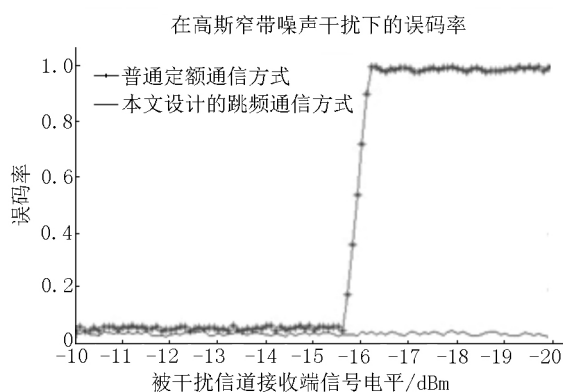


图5 误码率

从图5可以看出, 在同样功率的高斯窄带噪声干扰下, 对于普通定额通信系统, 一旦接收端信号电平低于接收灵敏度, 误码率将急剧上升, 而本文设计的跳频通信系统由于是在125个频点进行跳频通信, 所以在某个频点被干扰后误码率并没有出现大幅度上升. 所以本文涉及的跳频通信系统可有效抗干扰, 解决ISM频段的同频干扰问题.

2.2.2 抗宽频带干扰性能 在Matlab软件的simulink中对本文所设计的跳频通信系统进行仿真, 并对传输信道释放宽频带干扰, 系统的传输速率与被干扰频点数的关系如图6所示.

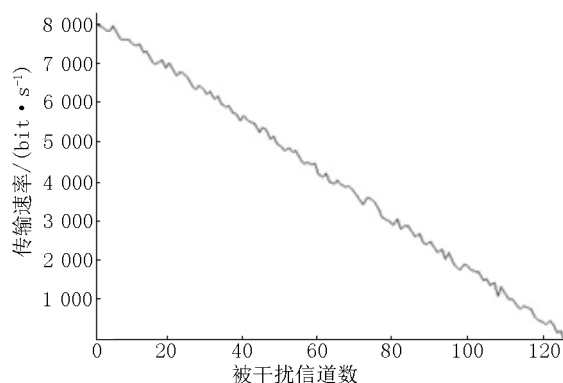


图6 被干扰信号数与传输速率关系

从仿真结果图6可以看出, 随着被干扰的频隙增多, 传输速率也会随之降低, 但只要有一部分频隙未被干扰即可实现正常通信, 只是传输速率降低, 系统的抗宽带干扰性能良好.

2.3 多用户组网通信性能

在测试多用户组网通信时, 主要测试其是否发生互相干扰, 故对于某一对通信设备来说, 其他设备的通信, 可看作是随机干扰. 在Matlab中模拟时, 对一对设备加若干个根据本文设计的跳频序列跳变的

高斯窄带噪声, 以模拟多对设备同时通信, 测试其是否产生相互同频干扰(即碰撞是否频繁). 测试结果如图7所示.

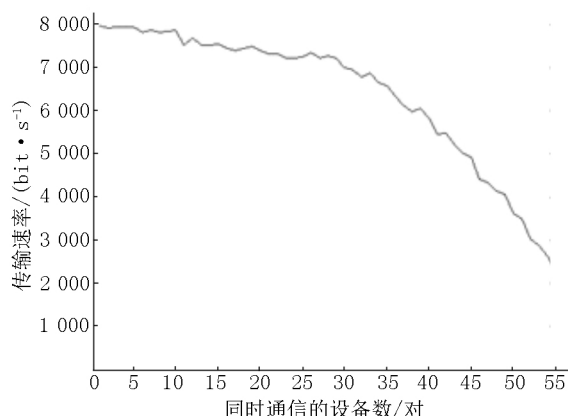


图7 同时通信设备数与传输速率关系

从图7可以看出, 在25对设备同时通信时, 传输速率基本不受影响, 可以保持在 $7000\text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 超过25对设备后才开始有明显下降, 完全可以满足组网通信的要求, 性能优良.

2.4 初始同步时间

根据在系统仿真得到的数据, 每次初始同步时间 $T \leq 40\text{ ms}$, 且没有同步失败的情况, 同步性能良好.

根据对上述性能的测试和分析, 基于 nRF2401 的多用户跳频双工通信协议性能优良, 达到了预期设计要求.

3 总结

本文提出了一种用于 nRF2401 的跳频通信方法, 分别采用跳频、跳频码分多址(FH-CDMA)、时分双工(TDD)等主要技术, 实现了 nRF2401 多用户同双工跳频通信, 较好地解决了工作于ISM频段 nRF2401 芯片同频干扰严重的问题, 实现了多址组网双工通信. 通过在Matlab的simulink中进行仿真, 对系统的跳频序列性能、抗窄带干扰性能、抗宽带干扰性能以及多址组网性能进行了测试, 各项性能优良, 达到了预期要求.

4 参考文献

- [1] 陈丽娟, 常丹华. 基于 nRF2401 芯片的无线数据通信[J]. 电子器件, 2006, 29(1): 248-250.
- [2] 侯天星, 王凤新. 基于 nRF2401 的无线数据传输系统[J]. 中国农业通报, 2009, 25(7): 258-263.
- [3] 刘文吉, 李健, 孙运强. 基于射频收发芯片 nRF2401 的

- 近距离射频研究 [J]. 自动化与仪表, 2006, 26(1): 75-78.
- [4] 孙保群. 基于 nRF2401 软件跳频协议的设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2012, 38(5): 46-49.
- [5] 魏玮, 张海勇, 王睿. 基于 Simulink 的高速跳频通信系统抗干扰性能分析 [J]. 现代电子技术, 2009, 33(21): 25-28.
- [6] 张崇, 于晓琳, 刘建平. 单片 2.4 GHz 无线收发一体芯片 nRF2401 及其应用 [J]. 国外电子元器件, 2004, 11(6): 34-36.
- [7] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 [M]. 7 版. 北京: 国防工业出版社, 2016: 399-401.
- [8] 罗翔, 周三文, 焦东立. 一种基于 RS 码的宽间隔跳频序列生成方法 [J]. 遥测遥控, 2015, 36(1): 24-29.
- [9] 廉保旺, 闻佳. 宽间隔 RS 跳频序列设计与实现 [J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5): 702-705.
- [10] 张远贵, 向新, 梅文华. 一种基于时间信息 TOD 的跳频同步方法 [J]. 现代电子技术, 2009, 33(2): 82-90.
- [11] 吴少雷. GPRS/CDMA 无线数据通信技术应用浅析 [J]. 安徽电力, 2006, 23(3): 58-60.
- [12] 曹育红, 田子键. TRF6900 在 MSP430 控制下的时分双工设计 [J]. 计算机工程, 2005, 31(8): 230-231.
- [13] 谢显中. TDD 模式与第三代移动通信系统 [J]. 现代电信科技, 2000, 30(2): 28-32.
- [14] 刘方, 彭代渊, 范佳, 等. 一类具有最优汉明自相关特性的跳频序列 [J]. 电子学报, 2013, 41(1): 13-17.
- [15] 叶继华, 郭帆, 余敏, 等. Intel X86 系列 CPU 模拟器的研究与实现 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 643-645.

The Design of Multi Hop Communication Protocol Based on nRF2401

WU Qi, PENG Xia, LIU Shuqin*, LUO Xingfang

(College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China)

Abstract: In order to solve the problem that the frequency interference and transparent transmission security of nRF2401 chip working in the ISM(industrial, scientific and medical) band are low, and multi-user duplex communication network of nRF2401 chip is realized, a frequency hopping communication method is introduced, which mainly adopts frequency hopping(FHSS), time division duplex(TDD) and frequency hopping CDMA(FH-CDMA) technology, realizes the multi-user frequency hopping duplex communication based on nRF2401 network. The main performance of frequency hopping duplex communication system designed in the paper is tested using simulink toolbox in Matlab software, and the main performance is good. It can solve the defects in the use of nRF2401 wireless transmission. The desired effect is achieved.

Key words: frequency hopping; time division duplex; code division multiple access

(责任编辑: 冉小晓)