

基于 MCU 的无源 Wi-Fi 散射通信方法

唐晓庆¹, 谢桂辉², 余亚军¹, 俞 杨¹

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北武汉 430205; 2. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 湖北武汉 430074)

摘 要: 与有源 Wi-Fi 相比, Wi-Fi 散射通信具有功耗低、成本低的优势. 但目前大多数研究都存在现场可编程门阵列(FPGA)功耗大和专用集成电路(IC)制作成本高的问题. 为此该文提出一种基于微控制器(MCU)的无源 Wi-Fi 散射通信方法, 用低主频 MCU 生成了纳秒级时序精度的 Wi-Fi 散射调制波形, 并进行了低功耗设计和优化, 开展了基于能量收集的 MCU 电源管理和无源系统设计, 并首次展示了基于室内弱光能量收集的无源 Wi-Fi 原型样机. 测试表明, 通信瞬时功耗 1.8mW, 比有源器件降低了 2~3 个数量级. 系统待机功耗 2.5 μ W, 有效通信距离 15m, 兼容现有的商用 Wi-Fi 设备, 且成本低, 无需电池.

关键词: 无源 Wi-Fi; 后向散射; 物联网; 低功耗

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)10-2069-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.10.007

Passive Wi-Fi Scattering Communication Method Based on MCU

TANG Xiao-qing¹, XIE Gui-hui², SHE Ya-jun¹, YU Yang¹

(1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, Hubei 430205, China;

2. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Wi-Fi backscatter communication has lower power consumption and lower cost than active Wi-Fi. However, most of the current researches have the problems of large power consumption of field programmable gate array (FPGA) and high manufacturing cost of application specific integrated circuit (IC). Therefore, a passive Wi-Fi backscatter communication method based on microcontroller (MCU) is proposed. The low-frequency MCU is used to generate the Wi-Fi backscatter modulation waveform with nanosecond timing accuracy. After the low power design and optimization, the MCU power management based on energy harvesting and passive system design are carried out. And the passive Wi-Fi prototype is demonstrated for the first time. Tests show that the instantaneous power consumption of communication is 1.8mW, which is 2~3 orders of magnitude lower than that of active Wi-Fi. The system has a standby power consumption of 2.5 μ W and an effective communication distance of 15 meters. It is compatible with existing commercial Wi-Fi devices and has low cost and no battery.

Key words: passive Wi-Fi; backscatter; Internet of Things (IoT); low power consumption

1 引言

Wi-Fi 是一种可以将便携式电脑、智能手机、打印机等终端以无线的方式互相连接起来的技术, 已成为我们生活不可缺少的一部分. 但是, Wi-Fi 通信会消耗大量电能, 且无论采用怎样的低功耗协议^[1], 都需要在通信的时候主动发射电磁波, 不可避免的耗电. 参考射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)通信原理^[2], 如果利用后向散射将空中已存在的电磁波调制

为 Wi-Fi 信号, 而不主动发射电磁波, 可以大幅降低发射功耗. 与其他散射通信方式相比, Wi-Fi 散射通信的接收端可以是路由器、手机、平板, 无需专用接收设备, 且 Wi-Fi 数据能直接接入互联网, 优势巨大. 近年来, 随着物联网的快速发展, 兴起了 Wi-Fi 散射通信的研究热潮^[3-8].

2014 年, 斯坦福大学提出 BackFi 技术^[3], 通过后向散射对路由器发出的 Wi-Fi 信号进行相位调制, 并在该路由器端解调. 这项技术能够实现较高速率、较远距离

的 Wi-Fi 散射通信,但需要重新设计路由器,使其具备自干扰消除功能和 BackFi 信号解调功能,硬件兼容性低。

2015 年,华盛顿大学提出 Wi-Fi Backscatter 技术^[4],通过散射调制 Wi-Fi 的信道状态信息和接收信号强度指示(Received Signal Strength Indicator, RSSI)实现数据上行,有源 Wi-Fi 设备通过开关控调制 Wi-Fi 数据包实现数据下行. 该技术与 Wi-Fi 设备兼容,但速率低、距离短。

2016 年,麻省理工 Dinesh 和斯坦福 Pengyu 提出双路由器 Wi-Fi 散射技术^[5],将路由器 A 发出的 802.11b 信号散射成另一个信道的 802.11b 信号,并用该信道的路由器 B 接收. 这项技术需要散射端具备码同步功能,且路由器 B 在已知 A 发送的数据时才能解调,使用场景受限。

后来,电子科技大学 YANG Gang 提出利用 Wi-Fi 正交频分复用信号的循环前缀进行散射通信的方法,采用多天线接收算法降低误码率,取得了较好的解析计算和仿真结果^[6,7],但需要散射端能够识别和同步循环前缀,系统实现复杂。

2017 年, Bryce 提出无源 Wi-Fi 技术^[8],通过后向散射把基站发出的单频电磁波直接调制为符合 802.11b 协议的 Wi-Fi 信号. 该技术兼容现有的商用 Wi-Fi 设备,且数据率较高、通信距离较远,被《麻省理工科技评论》评为“十大突破技术”之一. 但是基于 Altera DE1 FPGA 的原型样机功耗大、成本高,而无源 Wi-Fi 专用 IC 需要考虑其设计、流片费用、周期,距离实际应用尚远。

为此,本文提出了基于 MCU 的 Wi-Fi 散射通信方法,采用低主频 MCU 生成了纳秒级时序精度的 Wi-Fi 散射调制波形,并进行了低功耗设计和优化,开展了基于能量收集的 MCU 电源管理和无源设计,而且首次展示了基于室内弱光能量收集的无源 Wi-Fi 原型样机,其意义如下。

① 多数 Wi-Fi 物联网设备采用“MCU + Wi-Fi 芯片组”方案,本文把 Wi-Fi 散射调制集成到 MCU 中,形成单芯片解决方案,不仅简化了系统,还降低了成本。

② 基于 MCU 的 Wi-Fi 散射通信功耗比有源器件降低了 2~3 个数量级. 因此,很多小电流输出的电源也能够用于 Wi-Fi 通信中,例如新兴的薄膜印刷电池、微型纽扣电池等。

③ 用现有商用 MCU 即可实现 Wi-Fi 物联网产品的快速研发,避免了 Wi-Fi 散射 IC 设计风险,节省了流片成本和时间周期。

④ 原型样机摆脱了电池的束缚,实现了真正的无源,仅需要 2 μ A 的供电即可实现 Wi-Fi 散射通信,适用于不同的无源应用场景。

2 Wi-Fi 散射通信原理

根据 IEEE802.11 无线局域网媒体访问控制层(Media Access Control, MAC)和物理层(Physical layer, PHY)标准规范^[9],Wi-Fi 在直接序列扩频(Direct Sequence Spread, DSSS)模式下工作在 2.4GHz 频段:从中心频率为 2412MHz 的信道 1 到中心频率为 2484MHz 的信道 14,每个信道带宽 22MHz. 本文以信道 1 为例,其他信道同理. 该标准还规定 DSSS 模式支持差分二进制相移键控(Differential Binary Phase Shift Keying, DBPSK)调制,数据率 1Mbps。

因为采用了 11 码片的巴克码伪噪声(Pseudo Noise, PN)序列,所以符号速率 1Mpsps 时,码片速率 11Mcps. 经过 DBPSK 调制的 Wi-Fi 信号时域波形可表示为:

$$e_{\text{WiFi}}(t) = A \cos(2\pi f_{\text{WiFi}} t + \varphi_{\text{WiFi}}(t)) \quad (1)$$

其中, f_{WiFi} 是载波频率, $\varphi_{\text{WiFi}}(t)$ 是随 PN 码变化的二进制相位,取 0 和 π . 有源器件中 $e_{\text{WiFi}}(t)$ 可由正弦载波与“ ± 1 ”的 PN 码相乘得到,但 Wi-Fi 散射通信只能通过后向散射方式间接生成该信号. 图 1 是 Wi-Fi 散射通信的系统模型,包括基站、散射端、接收端。

① 基站:由射频信号源和天线组成,用于向空间中发射 f_s 频率的电磁波,如图 1 蓝色波形所示。

② 散射端:由散射控制单元、RF 开关和天线组成. 散射控制单元输出符合 Wi-Fi 协议的 DBPSK 方波,用于切换天线的吸收/散射状态,从而改变接收端的信号幅度. 可理解为,后向散射通过幅度调制产生了含有 Wi-Fi 数据包的新的频率分量。

③ 接收端:接收到的信号包含基站单频信号和散射调制生成的信号. Wi-Fi 接收端的信道滤波器能够滤除各种带外干扰,保留 Wi-Fi 数据包信号。

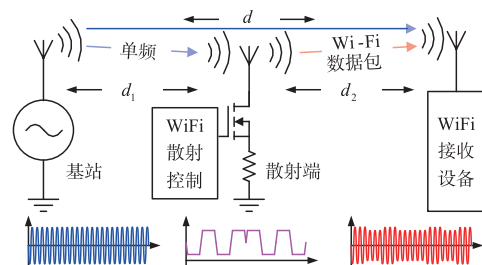


图1 Wi-Fi散射通信系统组成

为了简化系统模型,暂不考虑传播延迟、多径效应和信道噪声的影响. 首先,基站向外辐射单频电磁波:

$$e_{st}(t) = \sqrt{P_{st}} \cos(2\pi f_{st} t + \varphi_{st}) \quad (2)$$

其中 P_{st} 是发射功率, f_{st} 是频率, φ_{st} 是初始相位. 一部分电磁波经过距离 d 到达接收端:

$$e_{st_{rx}}(t) = e_{st}(t) \alpha_d \quad (3)$$

还有一部分电磁波经过距离 d_1 到达散射端:

$$e_{st_bs}(t) = e_{st}(t)\alpha_{d1} \quad (4)$$

其中 α_d 和 α_{d1} 分别表示各自传播路径的衰减,包括信道衰减和天线增益。

当散射控制信号为高电平时,射频开关导通,散射天线处于匹配状态, $e_{st_bs}(t)$ 被负载吸收,此时接收端仅接收到 $e_{st_rx}(t)$,故信号幅度较小。

反之,散射控制信号为低电平时,天线失配, $e_{st_bs}(t)$ 未被吸收,其中部分能量和 $e_{st_rx}(t)$ 一起传输到接收端,故信号幅度较大。

以上分析表明,接收端的信号 $e_{rx}(t)$ 可以通过散射控制信号 $e_{bs}(t)$ 对基站信号 $e_{st}(t)$ 进行幅度调制而得到,如图 1 红色波形所示。当 $e_{bs}(t)$ 是带有相位调制信息的方波(取 0 和 1)时,接收端接收到的信号为:

$$e_{rx}(t) = e_{rx1}(t) + e_{rx2}(t) \\ = e_{st}(t)\alpha_d + e_{st}(t)\alpha_{d1}\alpha_{bs}e_{bs}(t)\alpha_{d2} \quad (5)$$

其中第一项 $e_{rx1}(t) = e_{st_rx}(t)$,第二项 $e_{rx2}(t)$ 是调幅结果,即 $e_{st_bs}(t)$ 经过散射调制,再传输到接收端的信号。 α_{d2} 表示 d_2 路径的衰减, α_{bs} 表示散射调制导致的衰减。图 2 展示了 $e_{rx}(t)$ 的频谱,蓝色表示 $e_{rx1}(t)$,红色表示 $e_{rx2}(t)$ 。

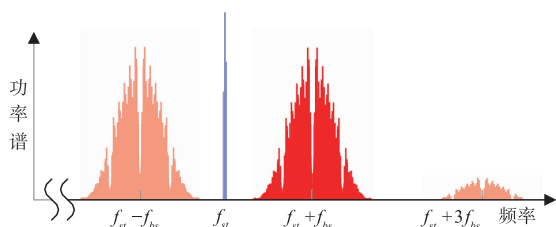


图2 接收端的信号频谱

考虑到方波 $e_{bs}(t)$ 的三、五次谐波功率仅为基波的 $1/9$ 和 $1/25$,故忽略高次项,仅保留基波:

$$e_{bs}(t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_{bs} t + \varphi_{bs}(t)) \quad (6)$$

其中 f_{bs} 是散射频率, $\varphi_{bs}(t)$ 是散射调制的相位,取 0 和 π ,因此:

$$e_{rx2}(t) = \alpha_{all} \sqrt{P_{st}} \left\{ \begin{aligned} &\cos[2\pi(f_{st} - f_{bs})t + \varphi_{st} - \varphi_{bs}(t)] + \\ &\cos[2\pi(f_{st} + f_{bs})t + \varphi_{st} + \varphi_{bs}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可以看到,该信号由 $f_{st} + f_{bs}$ 和频分量、 $f_{st} - f_{bs}$ 差频分量组成,其中 α_{all} 表示总衰减系数。如果滤除 $f_{st} - f_{bs}$ 差频分量,那么:

$$e_{rx2}(t) = \alpha_{all} \sqrt{P_{st}} \left\{ \cos[2\pi(f_{st} + f_{bs})t + \varphi_{st} + \varphi_{bs}(t)] \right\} \quad (8)$$

通过与式(1)对比,即得到 Wi-Fi 散射调制的两个必要条件:相位条件、频率条件。

① 相位条件 $\varphi_{st} + \varphi_{bs}(t) = \varphi_{WiFi}(t)$

因为 Wi-Fi 采用的差分 BPSK 解调结果仅与相位的

变化有关,又考虑到基站信号相位 φ_{st} 为常数,可以认为是 $e_{rx2}(t)$ 的初始相位。由于:

$$d \frac{\varphi_{st} + \varphi_{bs}(t)}{dt} = d \frac{\varphi_{bs}(t)}{dt} = d \frac{\varphi_{WiFi}(t)}{dt} \quad (9)$$

故 $\varphi_{bs}(t) = \varphi_{WiFi}(t)$ 即可满足相位条件。这说明,散射信号的相位变化等于最终散射生成的 Wi-Fi 信号的相位变化。

② 频率条件 $f_{st} + f_{bs} = f_{WiFi}$

对于给定的 f_{WiFi} (以 2412MHz 信道 1 为例),满足频率条件的基站频率 f_{st} 和散射频率 f_{bs} 有无穷多组解。为了降低功耗, f_{bs} 应尽量低。但 f_{bs} 过低会导致 f_{st} 和 f_{WiFi} 十分靠近,来自基站的 f_{st} 干扰将会落入 Wi-Fi 信道的 22MHz 接收带宽内。

经过折中,选取 $f_{bs} = 22\text{MHz}$, $f_{st} = 2390\text{MHz}$ 。这样正好使得每个码片周期内 ($1/11\text{MHz}$) 有两个完整的散射波形 (22MHz),可以更清晰地展示 Wi-Fi 散射调制的原理和实现方法。

3 无源 Wi-Fi 系统设计

基于 MCU 的无源 Wi-Fi 系统设计不仅需要 MCU 内部实现软件协议和编码,还需要实现硬件扩频和调制,是一次具有创新意义的探索与尝试。为此我们不仅要综合利用 MCU 仅有的计算、存储、外设资源,而且要充分发挥 MCU 的低功耗优势。

3.1 散射波形生成

Wi-Fi 散射调制波形的生成即是把以太网报文作为输入,按照 Wi-Fi 协议层、MAC 层、物理层标准规范,输出散射控制信号的过程,如图 3 所示。其中,如何用 MCU 快速、高效地完成大量重复的比特运算和操作是个难点。此外,怎样用 MCU 产生具有纳秒级时序精度要求的 DBPSK 调制波形也颇有挑战。



图3 Wi-Fi散射调制波形生成步骤

首先是数据帧处理,在 MAC 层完成报文的组帧,在 PHY 层完成物理汇聚、加扰,如图 4 所示。

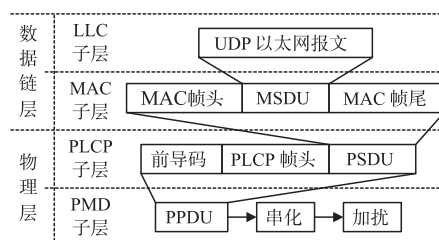


图4 数据帧处理流程

在这过程中,循环冗余校验 (Cyclic Redundancy

Check, CRC)、帧校验序列(Frame Check Sequence, FCS)生成、加扰都涉及到大量、重复的比特移位操作、比特逻辑运算. 这些操作、运算非常适合 FPGA. 但是对于 MCU 这种 8~32bit 固定位宽、顺序执行的控制器件来说, 每次 1bit 的操作、运算效率很低, 导致数据帧处理过程非常耗时. 为此本文分别采用了 MCU 的 CRC 硬件加速、FCS 翻转查找表快速计算、加扰序列预存的方法, 并结合汇编进行优化设计. 改进后, 数据帧处理时间由数百 ms 降低到 5ms 以内(1MHz 主时钟情况下), 大幅提高了计算效率, 降低了系统功耗.

其次, 经过差分编码、扩频得到了 11Mcps 的码片, 即 Wi-Fi 基带. 然后基带与载波相乘得到调制波形, 在 MCU 中该步骤是通过映射方式实现的. 码片“1”对应 0 相位的 22MHz 方波信号, 用比特序列“1010”表示, 码片“-1”则用比特序列“0101”表示, 如图 5 所示.

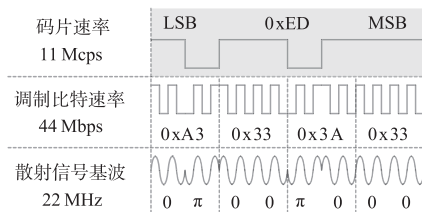


图5 码片映射调制波形

最后是以 44Mbps 速率从 MCU 端口输出调制比特. 如果利用 MCU 置位/复位指令使端口输出符合时序要求的 44Mbps 调制比特序列, 这不仅需要严格控制每条指令运行的机器周期, 而且需要 MCU 有足够高的代码执行效率和主频. 为解决这一问题, 本文利用 MCU 通用串行通信接口(Universal Serial Communication Interface, USCI), 并结合直接存储器访问(Direct Memory Access, DMA)控制数据传输, 形成了一种新的“USCI + DMA”散射控制信号输出方法.

USCI 基本原理是采用移位寄存器把字节串化成比特流输出. 为了达到 44Mbps 的速率, 串行发送缓冲器的字节更新频率应为 5.5MHz. 因此利用 USCI 可有效降低 MCU 数据搬移的频率.

循环查询 USCI 缓存器忙标志位的方法虽然能够完成数据搬移任务, 但是中央处理器(Central Processing Unit, CPU)一直在运行, 消耗了大量电能. 为此本文结合 DMA 实现了数据传输的精确控制, 并且在传输过程中关闭 CPU, 使 MCU 进入休眠模式, 以降低功耗.

3.2 低功耗优化

因为 BPSK 调制即是载波信号和“±1”码片相乘的过程. 考虑到数字序列和 0 异或的结果不变, 正如模拟信号与“1”相乘; 而数字序列和 1 异或的结果取反, 正如模拟信号与“-1”相乘. 根据上述异或(exclusive OR, XOR)和乘法的类比启发, 本文提出了“USCI + DMA

+ XOR”散射调制波形生成方法, 利用 MCU 的 22MHz 时钟、11Mbps 串行码片进行异或得到调制比特序列, 如图 6 所示.

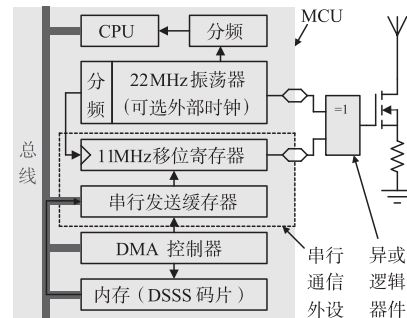


图6 USCI+DMA+XOR散射调制波形生成方法

该方法不仅将振荡器从 44MHz 降到 22MHz, 而且大幅降低了 USCI 的输出速率(由 44Mbps 降低到 11Mbps)和 DMA 数据传输频率(由 5.5MHz 降低到 1.1MHz). 因为 CMOS 电路的动态功耗与时钟频率成正比, 所以振荡器功耗仅为之前的一半, MCU 中其他部分功耗降到之前的约 1/4. 此外, 该方法还省略了调制波形映射、存储这一过程, 内存使用减少了近 80%.

综上所述, 虽然增加了一个逻辑器件, 但是该方法优势显著: 更低的主频、更少的内存、更低的 MCU 资源需求、更低的功耗、更低的成本. 因此, 使得更多广泛使用的廉价 MCU 也可以用于 Wi-Fi 散射通信的设计开发之中, 为无源 Wi-Fi 技术走向实际应用提供了较完整的解决方案.

3.3 无源系统设计

在基于 MCU 的无源系统设计与实现过程中, 会不可避免地遇到能量收集电流与 MCU 启动电流不匹配的问题. 这是因为 MCU 上电启动需要经历内核时钟初始化、内存初始化、数据程序加载、C 库初始化、系统初始化函数等一系列过程, 然后才能执行进入低功耗的指令. 经过测量, 在此期间的电流消耗约 200 ~ 300 μ A, 比收集的能量高了 2 个数量级.

为了使 MCU 能够在 μ A 级的小电流供电下正常启动, 一方面进行了编程优化, 尽量缩短启动时间. 另一方面采用 MCU 电源管理电路, 通过积累能量、电压监视功能, 为 MCU 的启动提供足够的瞬间功率. 但通常的电源管理 IC 滞回电压小, 需要系统配备大容量的超级电容或充电电池. 为此本文设计了阈值电压、滞回电压均可调的电源管理电压监视电路, 解决了这一问题.

然而, 传统的电源管理电路都会持续耗电, 使得收集到的有限能量捉襟见肘. 为此本文进行了改进设计和优化, 提出了一种超低功耗的 MCU 电源管理方法, 原理如图 7 所示.

MCU 依靠 C1 存储的电能完成启动之后首先立刻

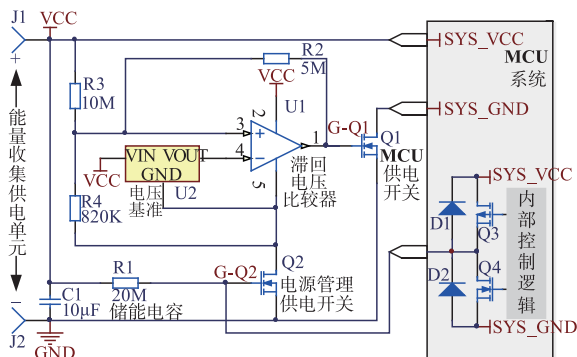


图7 超低功耗的MCU电源管理电路

控制 G-Q2 端口输出低电平,电源阀门 Q2 关闭,电源管理电路的地回路断开,然后 MCU 进入低功耗模式.此时由于 R2 和 R3 的上拉,Q1 仍然保持导通,MCU 系统仍然正常供电.所以整个 MCU 电源管理电路的功耗由 R1 决定,2V 供电时静态电流仅为 100nA!

因此,该电路能够大幅降低 MCU 电源管理的静态功耗,将收集到的极为有限的能量更多的提供给主系统,适用于能量收集供电的场景^[10].

4 无源 Wi-Fi 原型样机

如图 8 所示,基于 MCU 的无源 Wi-Fi 散射通信原型样机只有信用卡面积的一半,无需电池、无需 Wi-Fi 芯片组,且兼容现有商用 Wi-Fi 设备,具有成本低、功耗低、通用性强的优势.为了使 Wi-Fi 散射通信的数据更有意义,原型样机中还包含了板载的低功耗湿度/温度数字传感器 HDC2080,简单模拟了一个基于 Wi-Fi 散射通信的温度/湿度数据采集传输应用场景.

其中,电源部分采用了室内弱光电池片作为能量来源,使用 10 μ F 低漏电的储能电容积累电能,并通过 MCU 电源管理电路提供 2V 系统供电,从而实现了一个真正的可应用于现实生活中的无源 Wi-Fi 通信装置,彻底摆脱了电源线、电池的束缚.

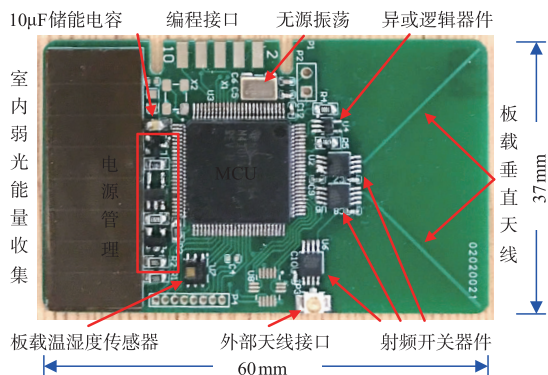


图8 基于MCU的无源Wi-Fi原型样机

原型样机的 MCU 选用 MSP430F5438A,最低供电电压 1.8V,主频可达 25MHz,内存 16KB,集成了 USCI

和 DMA 控制器.为了进一步降低待机功耗,可选用其他 MCU,例如 MSP430FR5969.

5 实验测试及结果分析

5.1 通信功耗测试

为了节省电量,原型样机默认处于待机状态.当需要发送 Wi-Fi 数据时,系统从待机状态唤醒.首先,启动 22MHz 振荡器,并等待振荡器稳定.然后,打开异或器件电源和时钟输出使能,启动 DMA 并进入低功耗.此时内存中的码片在 DMA 的控制下开始有序搬运到 USCI 缓存器,通过 USCI 端口输出,最后和 22MHz 时钟异或得到散射调制波形. DMA 传输完成之后,立即关闭振荡器、时钟使能、异或供电,再次进入待机状态.

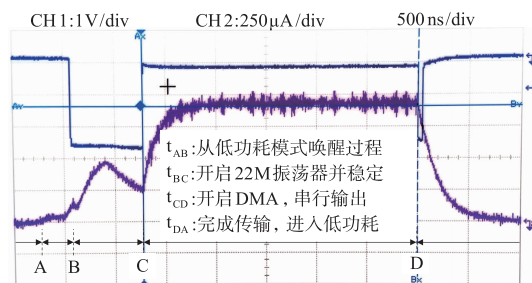


图9 无源Wi-Fi通信功耗测试

根据图 9 可以看到,绝大部分功耗都集中在 t_{CD} 时间段,电流 900 μ A,持续时间 2.7ms.与有源 Wi-Fi 芯片组相比,样机功耗降低了 2~3 个数量级.在 2V 供电情况下的通信瞬态功耗 1.8mW.同时测得待机电流 1.25 μ A,待机功耗 2.5 μ W.

因为本方法是基于 MCU 实现的无源 Wi-Fi,其功耗测量结果与 Wi-Fi 散射通信专用 IC 功耗仿真结果^[5,8]相比仍然较高.但是,本方法避免了 Wi-Fi 散射 IC 设计风险、节省了 IC 流片成本和 IC 设计验证时间周期,具有一定的优势.

5.2 通信距离测试

后向散射的通信机制决定了无源 Wi-Fi 较为有限的传输距离,无法像传统 Wi-Fi 那样实现百米级通信.为了测试其有效通信范围,我们设置了如下的测试方案.

在试验场地中间相距 5m 的两个点,分别布置基站和 Wi-Fi 无线网卡.设置基站发射电磁波的频率 2390MHz,功率 30dBm.设置网卡为混杂侦听模式,打开 Wi-Fi 侦听软件 CommView For Wifi.然后在试验场地范围内有序移动无源 Wi-Fi 设备,记录该设备在不同位置时,无线网卡接收到的信号强度 RSSI,并绘制 RSSI 等高线,如图 10 所示.

测试结果表明,无源 Wi-Fi 通信覆盖了以基站、网卡为焦点的椭圆.短轴可达 10m,长轴方向可达 15m,覆

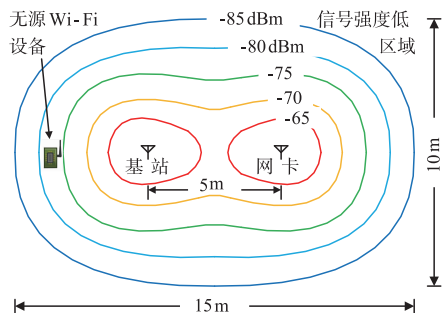


图10 无源Wi-Fi通信范围测试

盖总面积超过 120m^2 。

根据以上通信功耗和通信距离的测试结果,表1综合对比了当前国内外较为先进的 Wi-Fi 散射通信相关研究成果.其中 BackFi^[3]和本文都基于 MCU 实现了无源,但本文在通信速率、距离、兼容性方面优势明显.而文献[4,5,8]都基于 FPGA,不具备功耗优势,仅给出了 IC 功耗仿真数据.虽然文献[8]和文献[5]的通信距离分别达到了 30m 和 54m,但其前提是散射端必须十分靠近基站(1m 附近),且 Passive Wi-Fi^[8]基站采用了 6dBi 高增益天线. HitchHike^[5]通过单边带散射调制结合高灵敏度路由器解码增加了通信距离,但速率稍低,且需要接收路由器二次解码,兼容性一般.

表1 国内外较为先进的 Wi-Fi 散射通信相关研究成果对比

	2014 BackFi ^[3]	2015 Wi-Fi Backscatter ^[4]	2016 HitchHike ^[5]	2017 Passive Wi-Fi ^[8]	2018 本文
样机 电源	有源	无源	有源	有源	无源
处理器	FPGA	MCU	FPGA	FPGA	MCU
样机 功耗	—	< 1mW	—	—	1.8mW
IC 功耗	—	—	33 μW	14.5 ~ 59.2 μW	—
通信 距离	1 ~ 5m	2.1m	34 ~ 54m	9 ~ 30m	15m
通信 速率	1 ~ 5 Mbps	1kbps	200 ~ 300 kbps	1 ~ 11 Mbps	1Mbps
兼容性	低	较高	一般	高	高

5.3 通信功能测试

基于上述通信距离测试方案,把其中的无线网卡换成 TP-Link 无线路由器,使其工作在接入点 AP 模式,选择第一信道,并在路由器中设置无源 Wi-Fi 设备的 MAC 地址、IP 地址.然后把智能手机(华为 P7 为例)连接到该路由器,打开网络测试 APP,设置本地端口,并建立 UDP 连接.这时将无源 Wi-Fi 设备放入有效通信区

域,手机即可收到路由器转发的数据包,如图 11 所示.

试验数据内容包含了无源 Wi-Fi 设备终端号、数据包序号、温度值、湿度值.从数据包的序号可以看出,UDP 无线传输存在丢包现象,可用于对丢包不敏感的物联网应用场景.



图11 无源Wi-Fi功能测试手机端显示结果C

6 结论

与传统有源 Wi-Fi 相比,Wi-Fi 散射通信具有功耗低、成本低的优势.为了促进 Wi-Fi 散射通信技术在物联网中的实际应用,本文基于 MCU 平台,给出了一个完整的超低功耗 Wi-Fi 散射通信系统解决方案,同时利用室内弱光能量收集,实现了一个真正可应用于现实生活中的无源 Wi-Fi 通信装置.

本文主要解决了以下两个问题:①提出了“USCI + DMA + XOR”基带信号生成架构,解决了低功耗微处理器主频低和 Wi-Fi 散射通信要求的纳秒级时序精准控制的矛盾;②提出了一种应用于能量收集的超低功耗电源管理电路,解决了无源系统在微功率供电下 MCU 电流启动大的问题,同时最小化系统的静态功耗,提高了能量的利用率.最后展示了基于 MCU 的无源 Wi-Fi 原型样机,并进行了功能和性能测试.结果表明,样机发送的 Wi-Fi 信号能够被通常的 Wi-Fi 设备接收,有效通信距离 15m,待机功耗 2.5 μW ,通信期间功耗 1.8mW,而且系统组成简单,无需电池供电,具有非常大的实际应用价值.

参考文献

- [1] Ahmed N, Rahman H, Hussain M I. A comparison of 802.11ah and 802.15.4 for IoT[J]. ICT Express, 2016, 2(3): 100 - 102.
- [2] Want R. An introduction to RFID technology[J]. IEEE Pervasive Computing, 2006, 5(1): 25 - 33.
- [3] Bharadia D, Joshi K R, Kotaru M, et al. BackFi: High throughput WiFi backscatter[A]. ACM Conference on SIGCOMM[C]. ACM, 2015. 283 - 296.
- [4] Kellogg B, Parks A, Gollakota S, et al. Wi-fi backscatter:

- internet connectivity for RF-powered devices [A]. ACM Conference on SIGCOMM [C]. ACM, 2015. 607 – 618.
- [5] Katti S, et al. HitchHike; Practical backscatter using commodity WiFi [A]. ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems [C]. ACM, 2016. 259 – 271.
- [6] Gang Y, Liang Y C, Rui Z, et al. Modulation in the air: Backscatter communication over ambient OFDM carrier [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, PP (99): 1 – 1.
- [7] Yang G, Zhang Q, Liang Y C. Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5 (2): 1116 – 1130.
- [8] Kellogg B, Talla V, Smith J R, et al. PASSIVE WI-FI: Bringing low power to Wi-Fi transmissions [J]. Getmobile Mobile Computing & Communications, 2017, 20 (3): 38 – 41.
- [9] IEEE Std 802. 11™-2012 (Revision of IEEE Std 802. 11-2007) Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. New York: IEEE Computer Society, 2012.
- [10] Chabalko M J, Shahmohammadi M, Sample A P. Quasistatic cavity resonance for ubiquitous wireless power transfer [J]. Plos One, 2017, 12 (2): e0169045.

作者简介



唐晓庆 男. 1987 年出生于青海省格尔木, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为无源物联网通信、高速数字设计、舰船无线通信.
E-mail: 2010202120076@whu.edu.cn



谢桂辉 (通信作者) 男. 1988 年出生于湖南耒阳, 博士, 讲师, 主要研究方向为射频隐身通信、物联网、保密通信、物理层安全.
E-mail: xieguihui@cug.edu.cn