

文章编号: 2095-4980(2018)06-1027-06

基于 USRP 的 DBO-CSS 系统研究与实现

郑斯辉, 陈 翔

(中山大学 电子与信息工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: LoRa 是低功耗广域物联网的主流备选技术, 差分双正交编码线性扩频 (DBO-CSS) 调制则是该技术的物理层传输方案。为了解决 DBO-CSS 技术在典型物联网场景中面临的快速同步捕获、低信噪比可靠接收等关键难题, 基于 NI 公司的通用软件无线电设备 (USRP) 搭建了一套支持多用户接入的 LoRa 系统作为实验平台, 采用仿真和空口测试相结合的方法, 提出了基于改进匹配滤波器的同步算法和基于 2D-Rake 接收机的分集方案两项关键技术并完成性能验证。实验结果表明, 改进的同步算法对准确度有所提高, 而 2D-Rake 分集方案能使接收机获得约 3 dB 的信噪比增益。

关键词: LoRa 技术; 差分双正交 Chirp 扩频; 软件无线电; 2D-Rake 接收机

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1027

Research and implementation of DBO-CSS system based on USRP

ZHENG Sihui, CHEN Xiang

(School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: LoRa is one of the mainstream alternative technologies of Low-Power Wide-Area Network (LPWAN), which employs Differentially Bi-orthogonal Chirp Spread Spectrum (DBO-CSS) as its physical layer modulation. Rapid timing acquisition and reliable receiving in low SNR are the two most important issues when applying DBO-CSS in typical Internet of Things (IoT) scenarios. Therefore, a LoRa system supporting multi-user access is built utilizing the Universal Software Radio Peripheral (USRP) of NI Company. And two essential technologies including synchronization algorithm based on improved matching filter and diversity scheme based on 2D-Rake receiver are proposed and verified by simulation and experiment on this system. The results indicate that the improved synchronization algorithm has better performance in accuracy and the 2D-Rake receiver can provide 3 dB of gain in SNR.

Keywords: LoRa technology; Differentially Bi-orthogonal Chirp Spread Spectrum; software defined radio; 2D-Rake receiver

物联网时代, 通信传输具有覆盖区域广, 单次数据量小, 功耗低等特点或要求。目前诸如蜂窝通信、WiFi 及蓝牙等传统通信技术均无法完全满足这些要求, 从而低功耗广域技术网 (LPWAN) 应运而生。其中, LoRa 是由 Semtech 公司主导提出的一种 LPWAN 技术, 该技术通过先进的扩频技术和编解码方案, 致力于解决广域覆盖和低功耗无法兼得的难题, 在国内外已开始得到重视和应用。目前对 LoRa 的研究大多集中在其性能的分析或基于商用芯片的整系统搭建等, 对物理层接收技术的研究较少, 这是因为 LoRa 商业联盟仅对外公开 LoRaWAN 规范, 并未完全公开其物理层的详细技术细节和参数。因此为了研究 LoRa 系统物理层传输, 提出相关的接收算法和技术以提高传输性能, 本文参考 IEEE802.15.4a 协议^[1]中提出的 DBO-CSS 方案进行物理层系统搭建。这是因为 LoRa 系统的关键技术点是线性扩频技术, 而 DBO-CSS 系统同样采取这一技术来实现低功耗、高鲁棒性的数据传输, 在后者基础上针对扩频技术进行研究并提出的接收机方案对 LoRa 体制同样具有借鉴意义。

收稿日期: 2017-11-22; 修回日期: 2018-02-08

基金项目: 2016 年度教育部-NI 产学研合作协同育人项目-创新创业联合基金资助项目 (201601011053); 中山大学 2016 年本科教学改革与教学质量工程项目“基于“软件化”思想的通信原理实验教学”教学改革项目 (76120-18822601); 2017 年度创新创业教育改革项目“通信工程专业创新创业实践体系建设”资助项目 (201701009064); 国家重点研发计划“ICT 一体化 5G 开放网络架构研究”资助项目 (2016YFE0122900-3)

本文基于 NI 公司的通用软件无线电(USRP)平台,按照 IEEE802.15.4a 协议标准搭建了一个 DBO-CSS 系统。其中,在计算机上利用 LabVIEW 软件进行信号处理,完成系统的编解码、数字扩频及解扩等工作;硬件部分则由 USRP 作为射频前端完成空口信号的收发。考虑到广域低功耗技术中必然面临的低信噪比传输环境且典型的物联网应用场景,如智能水表、电表等中,终端设备体积足以配置双天线结构,在接收端提出了 2 种 2D-Rake 接收机方案,对多径的准确识别和空间信号的有效合并等难点进行突破,以期实现信号在空时两域的分集,从而提高传输鲁棒性。同时,本文在计算机链路仿真、实际空口传输 2 个层面对 2D-Rake 接收机的性能进行测试,验证其对系统性能的提升。最后,在点对点通信的基础上进行扩展和多用户接入方案的设计和实现,完成了一个基于 USRP 的典型物联网应用演示系统。

1 信号处理流程

1.1 信号发送流程

首先介绍 DBO-CSS 系统的发送流程,其发送系统结构框图见图 1。发射机首先对欲传输的二进制数据通过分路器分为 IQ 两路,并分别对 2 路数据进行双正交编码和交织编码,其中双正交编码通过增加冗余比特降低系统误码率,交织器是深度为 64 bit 的线性交织器。双正交编码的映射关系、交织器的模式均在 802.15.4a 协议中有具体描述。处理后的 IQ 两路数据前都插入协议规定的前导序列和帧起始符,其中前导序列为长度 80 bit 的全 1 序列,使用协议规定的星座映射方式完成正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制,再进行反馈长度为 4 的差分编码,完成四相相对相移键控(Differential Quadrature Reference Phase Shift Keying, DQPSK)调制。

数据完成编码、调制后需进行线性扩频,在数字通信系统中,线性扩频可以采用数字波形合成的方式实现^[2],即在信号处理部分产生离散的 chirp 扩频码,与 DQPSK 调制符号相乘之后,在 USRP 中完成数模转换(DAC)和上变频,最终实现线性扩频。协议中规定了 4 种扩频序列,本系统选用其中的第 IV 种。

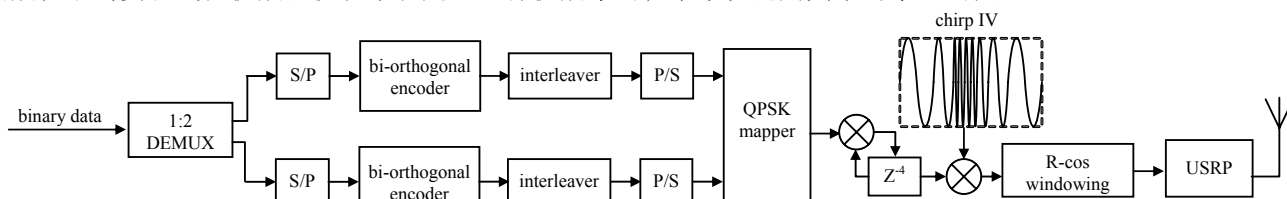


Fig.1 Transmission procedure of DBO-CSS system

图 1 DBO-CSS 系统发送流程图

1.2 信号接收流程

根据 DBO-CSS 系统发射机的特点,可以对应设计出接收机的架构,其具体处理流程框图见图 2。首先采用 USRP 设备作为射频前端,通过配置相应的中心频率、采样率等参数,完成下变频和模数转换等,得到待处理的基带信号。接收机使用双天线结构接收,2 份数据通过 2D-Rake 接收机完成空时两域分集合并后解扩成为符号,然后完成 DQPSK 和 QPSK 解调。利用发送帧中的帧起始符,可通过自相关运算对帧头进行定位,从而进行帧同步,然后完成解交织和双正交解码等工作,最终合并为一路二进制数据。

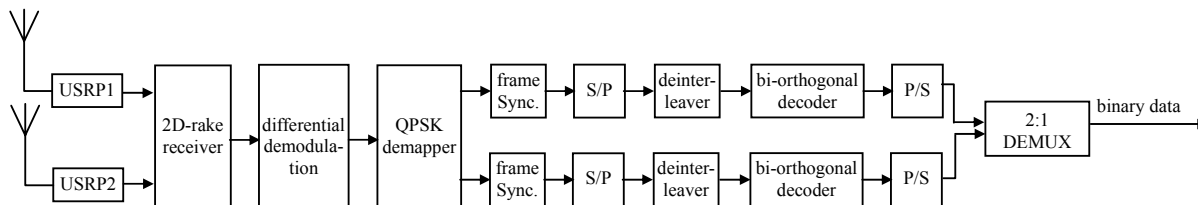


Fig.2 Reception procedure of DBO-CSS system

图 2 DBO-CSS 系统接收流程图

2 空时 2D-Rake 接收机

为了有效提升 DBO-CSS 系统在广域覆盖多径环境下的链路性能,本节重点研究 2D-Rake 接收技术。对于采用空时级联的 2D-Rake 接收机,其关键问题是有效合并时域及空域信号。空域、时域分集的常用方法包括选择

合并(Select Combining, SC)、等增益合并(Equal Gain Combining, EGC)和最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)^[3-4]等。在 DBO-CSS 系统中,时域上利用差分解调可在低计算量下实现 EGC 的同时获得较好性能;在空域上,采用 SC 能较好抵抗空间选择性衰落,减少低信噪比环境下通信中断的概率;而采用 MRC 则能充分收集空间分量,降低系统在低信噪比条件下的传输误码率。因此本文对基于空域 MRC 和时域 EGC、基于空域 SC 和时域 EGC 的 2 种 2D-Rake 接收机展开研究。这 2 种分集模式对系统的性能提升会更明显。

2.1 基于 SC 和 EGC 的方案设计

基于 SC 和 EGC 的方案在空域采用 SC,同时在时域选择 EGC 处理多径分量,其框图见图 3。

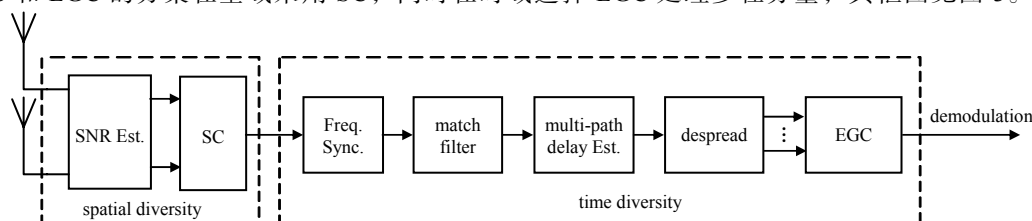


Fig.3 2D-Rake receiver based on SC and EGC
图 3 基于 SC 和 EGC 的 2D-Rake 接收机

首先对 SC 的处理过程作介绍,SC 的关键在于估计 2 路信号的信噪比并选择较高的一路。信噪比估计可利用前导序列或其中一段作为训练序列完成。天线收到的信号存在多径,信噪比估计过程以最强径作为标准。由于传统信噪比估计计算复杂,本文提出另一种计算量低的以信号比重参数 k 作为选择标准的计算方法。其定义式为:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^m \|t_i\|^2}{\sum_{i=1}^n \|T_i\|^2} \quad (1)$$

式中: $T_i=[T_1, T_2, \dots, T_n]$ 是接收信号中的训练序列; $t_i=[t_1, t_2, \dots, t_m]$ 是解扩后的训练序列符号。分子项可代表解扩后符号的功率大小,分母项可代表接收到的信号功率大小,二者的比值体现了有效信号的比重。 k 越大,说明该路信道条件越好。

完成空域处理后,系统先采用文献[6]中提出的方法进行频率同步,然后再进行时域信号的处理。时域 Rake 接收机的关键在于准确识别多径和估计各分量的时延,然后移动本地扩频序列与各分量分别对齐进行解扩,得到多份数据,通过 EGC 实现相干合并从而提高信噪比。其中,由于差分解调可将信道的相位偏移去掉,因此只需先将各径分别进行差分解调再合并,则等价于实现 EGC^[7]。

由于 chirp 信号具有脉冲压缩特性,因此 chirp 扩频系统一般使用匹配滤波器来进行定时同步^[5]。为了提高低信噪比下的定时和多径识别准确度,本文提出一种新的匹配滤波器。在协议中,每个 chirp 扩频序列由 4 个 sub-chirp 子序列组成,每个子序列分别调制 1 个符号,故传统的处理方法如文献[2]中所述,一般针对其中一个子序列设计匹配滤波器,但由于一个 sub-chirp 长度较短,其匹配输出结果不够理想。本文采用的匹配滤波器,匹配的对象是整个 chirp 扩频序列,匹配输出效果更好。考虑到前导序列是长度为 80 bit 的全 1 序列且 DQPSK 的反馈深度为 4,则调制后的前导序列中必然存在连续 4 个符号相同的情况,此时可以把相同符号提取出来,从而整个 chirp 序列可视作整体进行匹配滤波。图 4 显示了当接收信号存在 3 径时,采用 2 种方法进行匹配滤波的结果对比。图 4(a)为传统匹配滤波器的输出结果,可见虽然出现匹配尖峰,但是旁瓣干扰过大,容易出现误检;图 4(b)则是利用改进的匹配滤波器检测的结果,可以看出一方面主瓣和旁瓣幅值差增大,可以清晰识别到有 3 径;另一方面匹配脉冲的宽度更窄,对多径的分辨能力将有所提高。

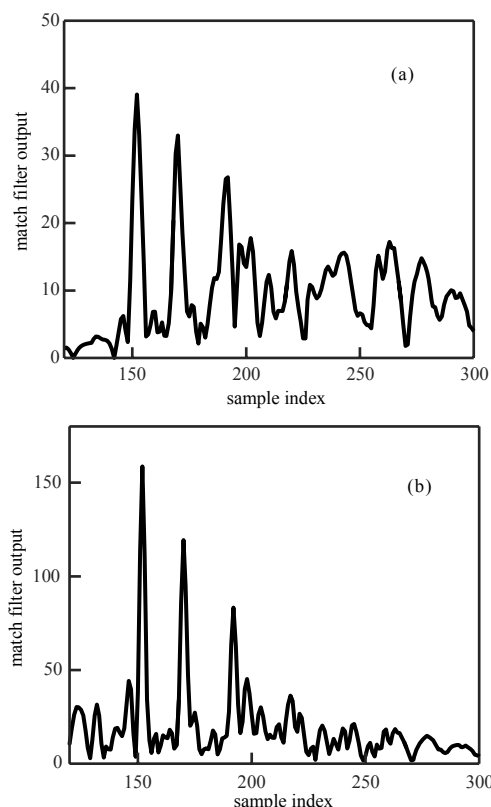


Fig.4 Output comparison of former and improved matched filter
图 4 改进前后匹配滤波输出结果对比

2.2 基于 EGC 和 MRC 的方案设计

基于 EGC 和 MRC 的方案则是在空域采用 MRC 实现分集, 在时域则采用与方案 1 相同的 EGC 对多径分量进行合并。因此, 以下部分将仅对 MRC 的具体实现作介绍, 时域部分处理不再赘述。该方案的框图见图 5。

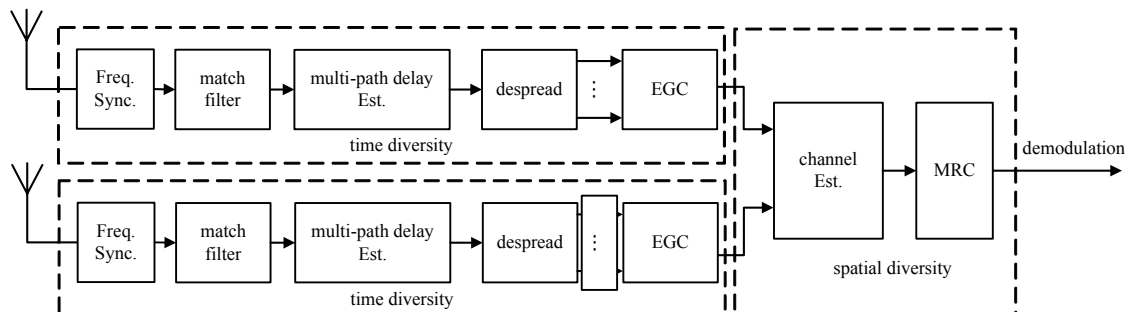


Fig.5 2D-Rake receiver based on EGC and MRC

图 5 基于 EGC 和 MRC 的 2D-Rake 接收机

假设发送符号为 $\mathbf{x}$, 经过 EGC 处理后 2 路解调结果为 $\mathbf{y}_1$ 和 $\mathbf{y}_2$ 。由于 EGC 过程中对多径信号进行了合并处理, 接收信号 $\mathbf{y}_1$ 和 $\mathbf{y}_2$ 可看成是 $\mathbf{x}$ 经过加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道得到的信号:

$$\begin{cases} \mathbf{y}_1 = h_1 \mathbf{x} + \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{y}_2 = h_2 \mathbf{x} + \mathbf{n}_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: h 表示信道的等价衰落系数; $\mathbf{n}$ 为高斯白噪声。假设完成了定时同步, 则可得解调的训练序列符号为 $\mathbf{t}_r = [t_{r1}, t_{r2}, \dots, t_{rn}]$, 本地的训练序列符号为 $\mathbf{t}_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}]$, 则 h_i 的计算公式为:

$$h_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\|\mathbf{t}_{ri}\|^2}{\|\mathbf{t}_{ii}\|^2} \quad (3)$$

根据最大比合并的定义, 为了得到最好的分集性能, 则合并的过程为^[8]:

$$\mathbf{y} = \frac{h_1}{h_1 + h_2} \mathbf{y}_1 + \frac{h_2}{h_1 + h_2} \mathbf{y}_2 \quad (4)$$

3 多用户接入方案设计

DBO-CSS 及 LoRa 系统主要应用于物联网海量设备接入和通信, 因此除了完成点对点通信系统的方案设计外, 本文还提出了基于 DBO-CSS 的多用户接入方案, 并以农业信息化作为应用场景, 利用 LabVIEW 软件丰富的 UI 控件搭建了一套完整的多用户接入演示系统。

图 6 是该演示系统的架构示意图。在农业信息化演示系统中, 其中 1 台 USRP 与 PC 连接作为基站端, 另外 3 台 USRP 分别与 PC 连接作为用户端。用户端模拟产生温度、湿度及风速等信息, 并通过 DBO-CSS 系统传输到基站, 基站端负责信息的实时显示和监控。考虑到系统的特点及实现的可行性, DBO-CSS 系统采用时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 的方式实现多用户接入, 由基站端广播定时信令, 用户端接收到信令后进行计时, 等待属于自己的时隙时传输数据给基站。在实际测试过程中, 由于 USRP 硬件约束 (USRP 和 PC 之间的数据传输接口缓存时延波动), 定时信令的接收和识别之间存在一个 100 ms 级别波动的时延, 给系统的准确定时带来干扰。为了确保 TDMA 系统正常运行, 多用户系统在时隙切换过程插入一定的保护时隙来降低对定时精确度的要求。在此传输和定时机制的基础上, 多用户系统的传输过程描述如下:

步骤 1: 各个用户节点进行初始化, 进入接收等待状态。

步骤 2: 基站端完成初始化, 下发同步信令, 并转入计时状态, 分时隙接收数据, 把每个时隙接收到的数据传输到不同用户的处理模块中。

步骤 3: 各个用户节点接收到同步信令, 转入计时状态, 并在设定的时隙内传输数据, 传输结束后接入接收等待状态。

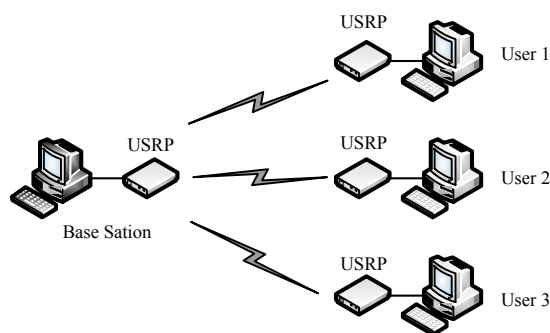


Fig.6 Architecture of the multi-user system

图 6 多用户系统架构图

步骤 4: 基站端完成一轮接收轮巡后, 重复步骤 2、步骤 3 继续进行传输。

4 系统测试与分析

参考 IEEE802.15.4a 协议中的规定以及上述提出的完整收发信机系统方案, 在 LabVIEW 软件上编写相应的图形程序, 实现数字信号处理和相关算法。重点对 2D-Rake 接收机进行仿真, 对比有无 2D-Rake 接收机及 2 种类型的 2D-Rake 接收机之间的误码率。同时在硬件上利用 USRP 完成空口测试, 验证 2D-Rake 接收机的性能。在此基础上, 通过配置多台 USRP 和 PC, 搭建多用户系统, 完成多用户接入的测试和功能验证。

4.1 仿真验证及分析

为了验证本文所提出的 2D-Rake 接收机方案对系统性能的提升, 在 LabVIEW 软件下编写了多径信道模拟器, 对于每根天线, 都共有 3 条多径, 2 根天线之间的多径和噪声信号相互独立, 仿真时多径信道的参数设置见表 1。

在此条件下, 误码率的统计结果见图 7。通过该图可以看出, 2 种方案的 2D-Rake 接收机均能获得一定的增益, 在相同误码率要求下, 可以采用更低的信噪比实现。如在误码率为 10^{-5} 时, 不使用 2D-Rake 接收机需要约 -7 dB 的信噪比; 而使用 2D-Rake 接收机只需要 -10 dB 即可, 系统能获得约 3 dB 的增益。同时, 在所设的仿真参数下, 可以看出, 基于“EGC+MRC”的方案略优于基于“SC+EGC”的方案。这是因为前者更充分的利用了双天线的数据, 同时获得分集增益和功率增益; 而后者仅选择了一路数据处理, 只获得了分集增益而没有功率增益。但“EGC+MRC”方案需同时处理 2 路数据, 处理量高于“SC+EGC”方案。因此 2 种方案都可获得增益, 并且存在各自的优点, 实际应用中可根据系统需求和条件进行选择。

4.2 空口传输测试

为验证实际传输中 2D-Rake 接收机对系统的性能确有提升, 本文还在中山大学公共教学实验中心 C 栋三楼走廊进行拉距测试。在实际测试环境中, 由于条件限制未能观察到明显的多径现象, 因此通过在空口传输中增加信道模拟器来进行测试。

表 1 多径仿真参数设置

Table 1 Parameter settings of multipath for simulation

		time delay/ μs	relative amplitude
antenna 1	path 1	0	1.00
	path 2	312.5	0.68
	path 3	625.0	0.41
antenna 2	path 1	0	0.80
	path 2	375.00	0.60
	path 3	718.75	0.37

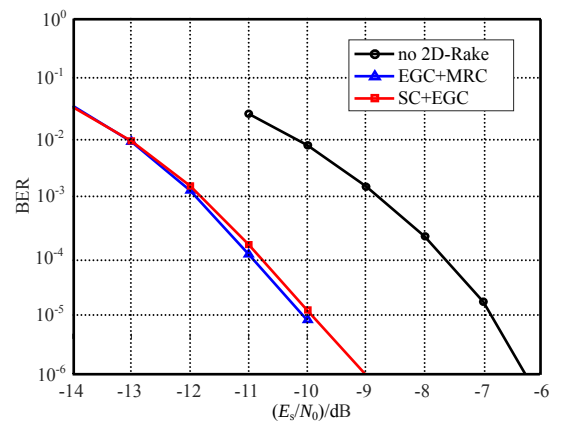


Fig.7 Bit error rate curves of the 2D-Rake receivers

图 7 2D-Rake 接收机的误码率曲线

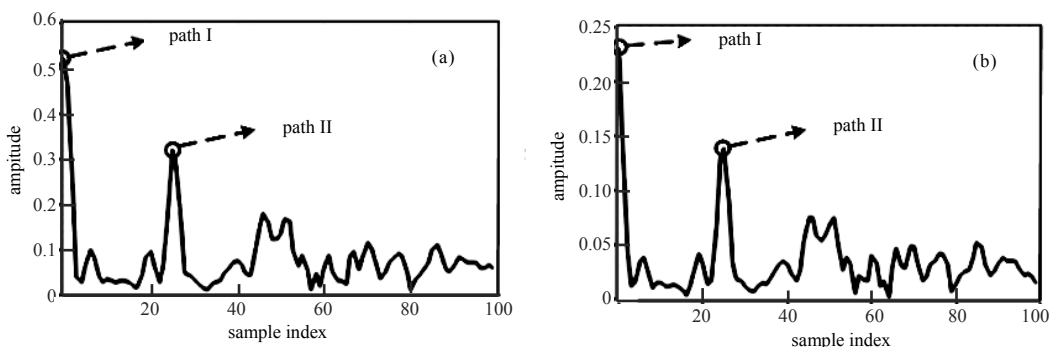


Fig.8 Multipath detection in air interface transport

图 8 空口传输中的多径检测结果

图 8 是实际空口传输中 2D-Rake 接收机对多径的检测结果(2 种方案情况类似), 其中采样点的时间间隔为 $31.25 \mu\text{s}$, 可以看出系统检测出 2 条多径, 并且其采样点间隔数和信道模拟器的设置相同, 可以初步看出 2D-Rake 接收机在时域能准确识别出多径。另外, 在相同的测试环境中, 若以误码率 10^{-5} 量级作为正常通信的标准, 经过反复测试, 当发射功率为 -5 dBm 时, 系统可传输的距离约为 9.5 m; 当使用 2D-Rake 接收机时, 2 种方案下系统传输距离均能提升至 11.5 m 以上, 可以看出 2D-Rake 接收机对系统性能有所提升。

4.3 多用户接入系统演示

在点对点传输系统的基础上,本系统扩展了多个节点,搭建了一个典型的物联网应用场景,即农业信息化的模拟传输系统。为了验证系统的正常运行,在中山大学公共教学实验中心通信实验室及走廊展开测试。测试过程设置了 4 个节点,包括 1 个基站节点和 3 个用户节点,其中基站节点和 2 个用户节点放置在实验室内,另外一个用户节点放置于实验室外走廊。测试结果显示,在所部署的测试场景下,系统的定时系统能够正常工作,解决多用户之间的传输冲突,图 9 是测试过程中的基站监测节点的界面展示。

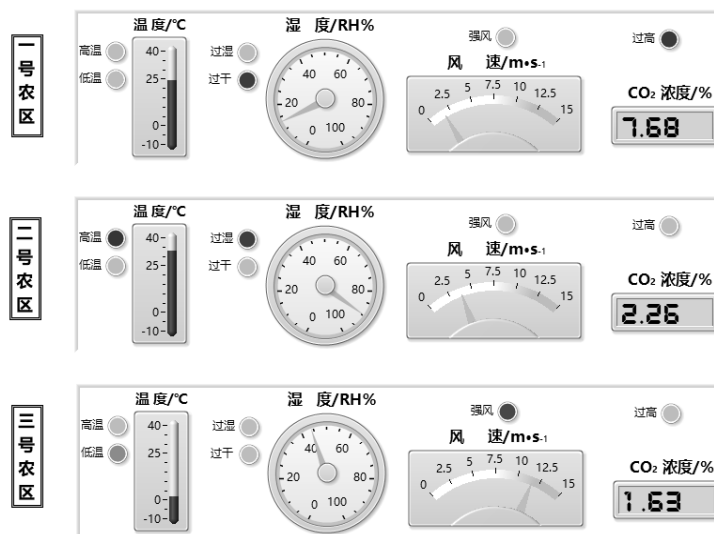


Fig.9 Monitoring interface of the base station nodes
图 9 基站节点监测界面

5 结论

本文参考 LoRa 体制,完整地设计了一套低功耗广域物联网应用的 DBO-CSS 收发系统,重点突破 2D-Rake 接收机算法的研究和实现,并最终在 USRP 上实现了多用户接入传输与应用演示。在研究过程中,本文所做的主要工作是在时域通过改进匹配滤波器解决了传统处理方法中定时和多径检测效果较差的问题;在空域则研究了选择合并、最大比合并两种分集方式,提出计算量较低的具体实现方案。同时除了从链路仿真层面上验证了 2D-Rake 接收机的作用,本文还通过外场实际空口传输测试进行性能对比。测试结果表明,2D-Rake 接收机确实对系统的稳定传输有所提升,能够提高系统在低信噪比下的传输鲁棒性。

参考文献:

- [1] LAN/MAN Standards Committee. IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.4:Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)[S]. IEEE Computer Society, 2011.
- [2] KIM S,CHONG J W. Chirp spread spectrum transceiver design and implementation for real time locating system[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015,11(8):1-15.
- [3] 黄开枝,陈国安,王京,等. 智能天线与空间分集接收技术[J]. 电讯技术, 2002,42(4):99-104. (HUANG Kaizhi,CHEN Guoan, WANG Jing,et al. Smart antenna and spatial diversity receiving technology[J]. Telecommunication Engineering, 2002,42(4): 99-104.)
- [4] 董晓华,阚春荣. 分集合并及 Rake 接收抗多径衰落技术[J]. 电子质量, 2014(3):25-27. (DONG Xiaohua,KAN Chunrong. Diversity combining and Rake receiving anti-multipath fading technology[J]. Electronics Quality, 2014(3):25-27.)
- [5] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (DING Lufei,GENG Fulu,CHEN Jianchun. Principles of radar[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [6] BAIK S H,YOON S H. A new frequency offset estimation algorithm for DBO-CSS in multipath channels[C]// Wireless Telecommunications Symposium,2008. Ponoma,CA:IEEE, 2008:102-105.
- [7] JEONG J,JANG S,CHONG J. RAKE receiving methods for IEEE 802.15.4a CSS system[C]// 2009 Third International Conference on Mobile Ubiquitous Computing,Systems,Services and Technologies. Sliema,Malta:IEEE, 2009:179-181.
- [8] LEE J S,MILLER L E. CDMA systems engineering handbook[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 2001.

作者简介:



郑斯辉(1997-),男,广东省揭阳市人,在读本科生,主要研究方向为软件无线电.email: zhengsh28@mail2.sysu.edu.cn.

陈翔(1980-),男,长沙市人,副教授,主要研究方向为无线与移动通信、卫星通信、物联网。