

The Research Process and Challenge of Logistic Sensors in Smart Cool Chain

Changjian Deng, Shiqi Jiang

Department of Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: chenglidcj@cuit.edu.cn

Received: Jan. 7th, 2016; accepted: Jan. 26th, 2016; published: Jan. 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Owing to its features of automation, information and network, the intelligent cold chain promotes the research process of logistic sensors: firstly, in order to monitor and record the real time temperature and relative humidity test data of cool chain, the transportation environment monitoring, container intelligence, truck smart position and so on adopt some new wireless sensors; secondly, in order to maintain the quality and fresh of food, the detection based on the mechanism of goods store and change adopts some new smart sensors; in the end, problems of large scale of data processing, data transmitting also promote the development of related sensor technology. So the paper reviews the sensor technology and its application occurred in cool chain logistic, introduces its newest research process, and gives a survey of its prospect and challenge.

Keywords

Sensors, Cool Chain, Wireless Sensor Network, RFID, Mechanism Model

智慧冷链物流传感器的研究进展与挑战

邓昌建, 蒋世奇

成都信息工程大学控制工程学院, 四川 成都
Email: chenglidcj@cuit.edu.cn

收稿日期: 2016年1月7日; 录用日期: 2016年1月26日; 发布日期: 2016年1月30日

摘要

以自动化、信息化和网络化为主要特征的智慧冷链加快了物流传感器的研究进展: 首先, 为监测和记录冷链中的温度和相对湿度等数据, 冷链的运输环境监测、集装箱智慧化、车辆智能定位等使用了一些新型的无线微型传感器; 其次, 为保证物品在冷链运输中的质量和品质特性, 在物品保存和变化机理的检测中也使用了一些新型智能传感器; 最后, 与这两类传感器对应的大量数据处理与传输问题推动了冷链物流传感器的其他新技术的进展。为此, 本论文回顾了智慧冷链中出现的传感器技术及其应用, 介绍了冷链物流传感器的最新研究进展, 并对其发展趋势与挑战进行了综述。

关键词

传感器, 冷链, 无线传感网络, 射频识别器件, 机理模型

1. 引言

“物流”是指物品从供应地向接受地的实体流动过程, 它将物品的运输、储存、装卸、搬运、包装、流通加工、配送、信息处理等基本功能实施有机结合。智慧物流链是基于供应链的, 既通过对信息流、物流、资金流的控制, 利用自动化、信息化、网络化的手段将供应商、制造商、分销商、零售商、最终用户连成一体的一体化运作模式[1] [2]。在智慧物流体系中, 各类传感器技术是基础, 物资的状态、地理等信息都依赖传感器技术, 如使用 RFID 技术、激光、红外、条码检测与识别技术对物品进行分类、拣选、计数; 采用全球卫星定位技术(GPS)、RFID 技术、车载视频检测技术等对物品运输进行定位等[3]-[5]。

近年来, 针对冷链运输过程中的温度和其它参数的测量, 很多学者进行了广泛的研究[6]-[12]: 如 Han Ding 等使用 R220 读写器、A9028R30NF 天线、ADXL330 三轴加速计、LM94021 温度传感器组成的冷链无线辨识与感知平台, 进行了温度异常估计、商品异常估计、运输异常估计[13]; Sebastian Zöller 等采用滤除冷链感知网络的不相关数据, 减低传输的数据量, 来减少能耗等[14]。

但是系统评估、整理、消化和丰富这些进展的文献不多; 本文的综述就是基于这个目的进行归纳和总结的。论文按照智慧物流的特点, 对近年来在冷链组成、智慧集装箱、智慧传输、冷链管理、冷链协同信息处理等环节的研究成果进行对比总结、原理分析、效果评估等研究。

2. 问题的描述

在冷链物流中, 对物品的质量和新鲜等控制与监控是制造者、提供者、传输决策者和消费者的持续要求。这本身也是对智慧物流传感器的不断挑战: 测量参数多并且使用环境不确定, 性能参数要求高又缺乏完善的标准等。目前开展的研究可以分为以下六类:

第一类是基于冷链测试的实验研究[15]-[21], 如 Luis Ruiz-Garcia 等使用无线节点, 通过对运输车温度、湿度、门的开关、卡车起动与停止的检测来研究物品水分和营养的损失等[22]; 这类研究存在的问题是如何克服研究的局限性和成果应用的普适性。

第二类是基于冷链食品变化机理的研究[23]-[29], 如 Almonacid 和 Torres 建立了数学模型以评估温度给冷藏固体食物带来的负面影响[30]; McNab 等[31]提出了采用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)模拟方法的微生物风险评估模型等。这类研究存在的问题是如何评估机理的正确性和传感器应用的有效性等。

第三类是基于逆向物流模型的研究[32]-[34], 如宋亮等研究的逆向物流网络优化设计模型。这类研究的难点在于废弃物及其影响的动态检测问题[35]。

第四类是基于智能集装箱的研究[36]-[38], 如德国的 CRC 合作研究中心研究了具有联网的货运质量评估、运输管理、动态抗干扰的能力的智能集装箱。

第五类是基于物流网、大数据下的冷链协同信息处理研究[39]-[42]。如 Miguel Castro 等基于物联网建立了柔性、感知性强的冷链监测、跟踪和监控系统(TTS) [43]。

第六类是基于冷链管理的研究, 相关的标准如在欧盟国家, 分销商和其他供应链合作伙伴必须遵循 ATP(国际易腐食品运输的特殊协议) [44] [45]。

在这六类研究中, 传感器的研究分类如图 1 所示, 而相关的技术难点用表 1 表示。

3. 冷链运输(智慧集装箱)中的传感器应用技术进展

智能集装箱是一个分散决策和自治的智能容器, 其功能是提供一个分布式的基础设施, 便于实现过程监测与控制。它一般采用智能代理实现系统软件功能; 采用基于 RFID 的智能标签来检测货物; 采用基于无线传感器网络的检测系统实现容器内部的在线质量评估等[46]-[49]。

货运环境监测无线传感器网络(WSN)使用的传感器有温度、湿度、加速度、目标浓度气体传感器以及厢门开关传感器等。装入集装箱后, 所有已部署的传感器节点自主形成 ad hoc 等无线网络, 代理平台/网关系系统作为传感器网络的基站。

本节首先介绍食品药品检测要求, 而后分析在这些要求下对应的传感器的发展。

3.1. 易腐食品的传感器检测要求

因为在失败的冷链中, 农产品会过度成熟、颜色和质地会发生变化, 而持续、可靠的温度控制可以最大限度地减低患上食源性疾病的风险。表 2 给出了四组产品对温度的要求[49]。

EN12380 规定适合冷藏运输的食品, 对应的合适测量温度范围是 -25°C 到 $+15^{\circ}\text{C}$, 精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 分辨率 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

依据这个要求, 如要建立实时的检测平台, 在智能集装箱需安装的有线传感器会达到数百个, 并要求具备低成本、可靠性高、对食品安全等特征。依据测量的精度设计规则, 传感器的要求比 EN12380 要高一个等级, 这是低成本传感器在高精度应用下的一个挑战。

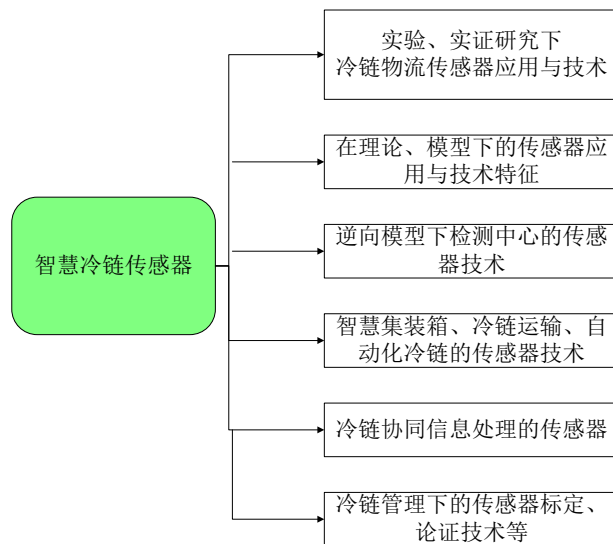


Figure 1. Classification of research of smart cold chain sensors
图 1. 智能冷链物流传感器的研究分类

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 标准试验系统结果数据

分类	传感器研究难点	传感器研究重点
基于冷链测试的实验的研究	实验研究的局限性、成果的普适性	试验设计、测试与数据分析
基于机理的研究	过程状态检测、安全检测传感器	物理原理、模拟评估、决策系统
基于逆向物流模型研究	测量的协同处理	废弃物、污染、辐射等的空时测量
基于智能集装箱的设计研究	动态抗干扰、寿命等	联网的货运质量评估、运输管理
基于大数据的信息处理研究	满足资源、能量、安装和环境约束	冷链监测、跟踪和监控
第六类是基于冷链管理研究	实验与测试标准	检测传感器的测试、论证和实验标准

Table 2. The different demands from different product

表 2. 不同产品对温度的要求

温度范围	适合的产品
-18℃以下	-25℃冷冻冰淇淋, -18℃ 其他食品 and 食品原料
0℃~1℃	冷冻新鲜肉类和家禽, 大多数奶制品和肉类, 大部分蔬菜和一些水果
5℃	冷冻一些糕点产品, 黄油, 脂肪和奶酪
10℃~15℃	适合土豆, 鸡蛋, 充满异国情调的水果和香蕉

所以比较合理的温度传感器选择包括一线式智能温(湿)度传感器、总线制半导体温度传感器、无线温度传感器、智能 RFID 等。

3.2. 医药冷链对传感器的检测要求

医疗产品如疫苗、血液和一些药品及其他对温度敏感的产品, 这些产品的冷藏温度大多数在 2℃~8℃ 之间, 并且这个温度需要在供应链的每个阶段得到保证。如果疫苗等被不合适的温度损坏, 那么可能对健康或生命产生损失。

世界卫生组织规定: “在特殊的贮存条件下的测量数据(例如在运输过程中的温度和相对湿度), 都应该能被提供、检查、监测和记录”。还指出: “车辆的测绘温度应支持车辆两端的温度均匀性; 记录的温度监控数据应该是可以被追溯的”。

这些就对智能传感器的存储容量、数据处理能力、安装提出了要求。为此, 下文分析两类智能传感器: 智能 RFID、无线微型(温湿度)物流传感器。

3.3. 智能 RFID 传感器

智能 RFID 技术是在 RFID 传感器硬件上配备多参数的检测、时间记录等功能, 形成智能标签; 这样既可以检测环境, 又可以预测剩余的保质期。

近期的研究包括: Abad, Mattoli 等研究了在冷链使用的结合温度、光照、湿度的 RFID 智能标签[50] [51]; Steinberg、Zampolli、Kassal、Unander 研究了 RFID 与化学传感器结合的智能标签[52]-[55]; Fernandez 研究了 RFID 与压力传感器结合的智能 RFID 传感器[56] [57]; Kang 研究了 RFID 与 SAW 传感器结合的智能 RFID 传感器[58]等。

在 RFID 的无线传输上, 实验表明了 2.4 GHz, 915 MHz 及 433 MHz 三种典型的物流 RFID 的使用频率中, 915 MHz 及 433 MHz 具有较好的应用特征。而在测试的精度上, 实验表明, RFID 智能标签

的温度平均值偏差可小于 0.12℃, 而标准偏差可小于±0.15℃ [59]。

这里介绍三种实例:

1) 基于 CMOS 工艺的智能湿度 RFID

Xiang Wu 等研究了使用标准 0.18 um 的 CMOS 工艺的智能 RFID 技术。他们采用顶部存积的金属层形成内部的数字化电极, 用聚酰亚胺填满形成湿度传感层, 使用动态偏置电压的差分驱动结构提高整流器的源栅级有效电压, 并使之具有平滑的有效功率曲线。器件采用基于锁相环的电容性传感器接口(能工作在 0.5 V), 其结构框图见图 2。这种智能 RFID 的发送信号, 能在间隔 23 米被 4 W 功率的接收器有效接收, 而它的功率消耗只有 2.5 uW。这种智能湿度 RFID 在 10% 到 90% 相对湿度下有较好的线性度、较小的磁滞、较好的稳定性, 能满足一般应用的要求, 其灵敏度为 18.75 fF/%RH [50]。而这种结构在类似的温度、气体智能 RFID 中也被应用。

2) 基于有机/印刷柔性工艺的智能 RFID

基于(金属或非金属)薄膜的印刷器件具有重量轻、可折叠/弯曲、透明、薄而规则、可穿戴、能大规模制作、成本低等特点。这类 RFID 器件一般集成了内存、电池、显示、电子感知、通信等功能。

这里介绍 Danick Briand 等在欧盟研究 FlexSmell 中的实例: A) 温度传感器: 采用银墨打印机结合镍电镀在塑料薄膜上开发温度传感器, 这种热电阻具有良好的线性特征; B) 冲击传感器: 采用表面微机械工艺在塑料薄膜进行加工——聚酰亚胺工艺, 即使用隔膜形成异常低功耗的电容器件进行冲击的加速度测量[60]-[70]。

3) 基于卡纸板的智能 RFID

José Fernández-Salmerón 在卡纸板上集成了商用的力传感器和打印的门打开传感器。这种结构的表现形式上是被动的单芯片 RFID 标签, 一般这种标签还集成了温度传感和电子选择开关[71]。

这些 RFID 也有商品可供选择: 如 SL900A, 这个 RFID 集成有 A/D 转换器, 它具有 50 mV 到 160~610 mV 的内部电压参考。其内置的温度传感器测量范围为-89 度到 85 度, 分辨率为 0.18 度。一般电阻可以直接接在 RFID 芯片的 SFE 端。天线的工作频率是 868 MHz。

3.4. 无线传感网络与其他无线技术

Luis Ruiz-Garcia 等对比了在食品和农业中使用无线传感的通信技术和标准, 指出与蓝牙等相比, RFID 和 WSN 是较好的技术。他们提出采用基于 ZIGBEE 的 WSN 技术。在无线传感网络中, 传感器的选择相对多、而且灵活, 如使用 SHT11 温湿度传感器、温度压力传感器 MS5534B、光强传感器 TSL2550D、两轴加速度计 ADXL202JE 等等[49]。

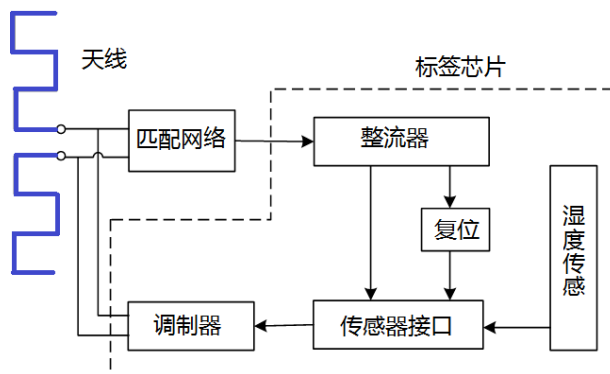


Figure 2. The structure plot of smart humidity RFID
图 2. 智能湿度 RFID 传感器的结构框图

由于物流中采用的 ZIGBEE 使用 2.4GHz 的通信频率, 虽然通信特性低于 868 MHz、945 MHz, 但它的功率可以略高。目前也有一些采用其他频率的物流 WSN 网络(包括相关协议)的研究。

4. 基于模型的冷链物流传感器应用技术进展

4.1. 冷链物品(食物)变化机理与受影响模型

在冷链食物模型中, 安全可靠的食品由食物包含的微生物数量决定的, 而且微生物的数量在食物运输过程中是不断的变化的。因此, 微生物的数量越多, 食物的安全可靠程度越低。

1) 微生物在运输过程中的增长建模——微生物测量。

根据“T.T.T”(温度, 时间, 忍耐性)食物运输理论。微生物在食物中的数量主要受到温度和时间的控制。Zwietering 提出一系列的微生物增长的指数模型[72]。

$$N_t = N_0 e^{b^2(T-T_{\min})^2(t-\lambda)} \quad (1)$$

其中: N_t 是微生物在时间 t 时刻的集合(CFU/g); N_0 是微生物最初的集合(CFU/g); b 是一个在实验中的参数; T 是在运输过程中的温度($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} 是在没有增长时的温度($^{\circ}\text{C}$); λ 是微生物增长的滞后时间(h)。由模型可以计算出温度和时间对食品的影响。

测试微生物的方法有浮游微生物采样器、酶抑制法和光电比色法等。基于智能 RFID 和无线传感网络的比色等测量由于技术略复杂, 目前这方面进展不多。

2) 有氧呼吸模型——气氛测量

相关研究表明: 香蕉的有氧呼吸率是 O_2 和 CO_2 浓度的函数。大气包装(MAP)产品的新鲜度控制依赖于控制包装里的气氛, 因为这样可以改变自然相互作用的呼吸率。

呼吸率: 新鲜率可以表示成氧气消耗速率和/或二氧化碳产生率的函数。

$$R_{\text{O}_2} = -\frac{1}{M} \cdot \frac{dV_{\text{O}_2}}{dt} \quad (2)$$

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{1}{M} \cdot \frac{dV_{\text{CO}_2}}{dt} \quad (3)$$

在 V 是部分体积在顶部空间的包, R 是呼吸速率, 表示为体积的气体生成/消耗每单位时间(t)和产品的重量(M)。

在测试方面: 呼吸率定义是在 21°C 测量, 采用封闭系统, 样品放在密封的玻璃瓶, 其中原来空气作为最初的气氛。气体采集标本定期通过这种密闭鼻中进行采样与分析, 测量装置可以选用 Oxybaby $V_{\text{O}_2/\text{CO}_2}$ 气体分析仪, 其校准用标准气体, 也可以采用气体检测智能 RFID 和无线传感网络。

3) 成熟度模型——乙稀测量

一般使用得到的气态激素乙烯来进行衡量或估计当前的农产品成熟的状态。方法是采用一个微型的高分辨率气相色谱仪, 测量成熟度指标包括挥发性芳香与乙烯。

能进行成熟度的方法包括: 通过减少冷藏集装箱容量; 控制气体成分(CA); 降低温度(可以较少乙烯产生和对乙烯的敏感度)。这些过程的监控, 需要使用乙烯传感器, 如使用基于智能 RFID 和无线传感网络的乙烯测量。

4) 水分模型——湿度测量

90%至 95%的相对湿度(RH)环境是大多数水果和蔬菜所需要的。一些产品诸如洋葱, 冬南瓜, 大蒜, 姜应保持在相对湿度 70%的环境里。

湿度控制方法研究如下: 采用特殊包装; 配备喷雾增湿系统; 配备有一个可调的新鲜空气通气量来

控制空气进入容器。这些需借助湿度的测量, 有关湿度传感器的智能 RFID 等进展在 3.3 与 3.4 节进行了叙述。

5) 物理损伤——振动与冲击测量

振动、挤压、冲击会造成物理损伤。振动损坏是由于车辆在公路上行驶时振动的运动, 而振动损伤最大的地方是在弹簧悬挂轴的位置, 所以空气悬架能地降低了振动损伤。

防止振动的方法有: 配备空气悬挂系统; 安装后轴的悬架系统; 合理的摆放位置(对振动敏感的农产品应放在至少最后的两个托盘的位置)。这些需借助振动和冲击的测量, 有关研究进展见 3.3 与 3.4 节。

4.2. 与变化机理测量相关的传感器技术

1) 智能气体(包括乙烯)RFID

一般使用有机薄膜晶体管(OTFT), 电容器、谐振器的原理在塑料薄膜上印刷。由于电容具有异常低的功耗、较好的灵敏度, 一般选用容性传感器来实现。

如一个设计实例是: 在聚乙酯电容与聚对苯二甲酸乙二醇酯上印刷或电镀容性的化学传感器, 集成 AD7746 的模数转换器。这种传感器采用 5 μm 薄的 Ni 电镀到梳状电极的电容性, 使用聚酯箔聚乙烯层组成波导, 形成各种敏感层, 进而进行测量[61]。

2) 气体检测无线传感器

无线传感网络可供选择的氧气、 CO_2 以及乙烯测量的传感器较多, 目前受到关注还是基于 MEMS 的气体传感器技术。

氧气传感器采用氧离子导体、参考电极和待测试样构成伽伐尼电池, 通过测量装置的电动势, 确定待测试样的氧含量或氧分压。而二氧化碳传感器利用 CO_2 对红外线在 4.26 μm 处波段吸收效果比较强来进行设计; 乙稀传感器采用电化学原理进行设计。

5. 冷链中逆向与违规物流的传感器应用技术进展

针对冷链, 可能存在的逆向、违规物流问题, 需要研究传感器在冷链逆向物流中的应用进展。逆向物流一般采用开环结构和闭环结构运行; 开环用于回收物品不回到初始的生产商, 而回到其他接收地的情况; 闭环结构指回收的物品回到初始的生产商的情况。

这里涉及到违规、废旧食品药品测量与运输控制问题。相关的研究如下: WOOD 提出了确定性禁止网络模型, 为在有限的资源中, 把偷运者能建立的网络最小化, 这样一个禁运网络是 NP 难的问题[73]。在此基础上, WOOD 和 Israeli 使用了确定的双层编程框架, 以最大化偷运者运行的最短路径[74]。Dimitrov 等提出随机网络模型, 并把测量技术应用到了网络中[75]。如在运输中的人行道环形检测器、道旁的车辆计数站、车辆辨识器等; 在检测站的固定和手持探测器、RFID 传感器等[76]。

另外, 在冷链中, 医疗产品及其辅助电子仪器的回收也是要考虑的问题之一; 同时由于在低温下, 冷链具有细菌等难以生长的特点, 使冷链能应用在这些物品的逆向物流中。为此需要在温度控制的同时, 增加多种检测(控制)手段提供更可靠、更广泛的应用。

在传感器技术中, 危害物、辐射度、废弃品的无线传感、RFID 多参数检测或总线测量是增加这种应用的基础[77]。目前结合环境监测的无线传感网络、智能 RFID 应用到智慧物流领域, 对物流传感器的应用仍然是一个挑战。

6. 冷链协同信息处理研究的传感器应用技术进展

在这个方面有很多研究, 主要分为对无线传感器网络的信息处理研究、智慧 RFID 的信息处理研究、以及其他方式冷链物流传感器的信息处理研究。

6.1. 冷链无线传感器网络融合信息处理研究

在数据处理方面: Luis Ruiz-Garcia 采用了 Zigbee 网络连续测量了物流运输时的物品状态情况, 测量了 1051 公里, 融合处理了一系列的测量数据, 其处理方法如下: 采用的标准方差为参数指标如(4)式所示, 这里 n 是发送的包总数, p 是在实验中的丢包率[23]。

$$SE = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (4)$$

采用因子方差分析(ANOVA)来评估不同测量类型的效应, 如: 温度、湿度、大气压、光强、加速度模块。使用 ASAE 标准 D271.2 进行湿度测定。

在降低传输量方面: Sebastian Zöller 等研究了物流传感网络的能量有效、高性价比的传感网络应用特征, 开发了在网络确定传感数据相关性的滤波方法, 以减少数据传输量[14]。

Huping Xu 等研究了在物流系统中传感器部属以获取较好覆盖率和连通性的问题, 他们采用可信信息覆盖模型, 其中使用了两种启发式算法: 连通覆盖信息和带可移除的冗余中继部署算法[77]。

6.2. 冷链 RFID 融合信息处理研究

由于 RFID 存在大量的测量数据, RFID 的数据管理研究进展比较多, 如 RFID 的数据仓库和多余数据的剔除、RFID 的数据查询、RFID 的数据清理以及 RFID 的数据压缩。有关的研究者和提出的研究[78]-[86]如表 3 所示。

下面介绍几个实例。

1) RFID 的数据压缩

Hua Fan 等提出了分离路径策略下的 RFID 的数据存储模型, 该分离路径基于树的拓扑结构。他们首先把路径信息进行数据分离, 按照两分岔路径分别进行存储, 极大地减少了信息量[87]。

2) RFID 的数据处理

Ki Hwan Eom 等使用神经网络对 kalman 滤波中测量噪声矩阵进行在线调整, 这样提高智能 RFID 标签中测试数据的精度: 如温度(提高 MSE 达 40.1%)、湿度(提高 MSE 达 60.4%)、氧气(提高 MSE 达 60.4%)等[88]。

Table 3. The data process research of RFID

表 3. RFID 的数据处理研究

研究者	算法
Mahdin	效率检测并移除无效数据
Gonzalez	移动图模型压缩 RFID 数据集
Bashir	网络在线重复数据滤波
Bai	数据流查询语言-采用滑动时间窗和时间算子
Park	数据查询索引
Wilfred	查询和分析的总体框架
Valentine	自适应滑动窗, 基于 WSTD 减少误读数
Rao	基于序列规则探测与矫正数据异常
Chen	Bayesian 整理原始数据
Gonzalez	提供数据清洗的整体框架

3) RFID 的车辆定位

Xiang Song 等在 GPS 基础上, 利用 RFID 的接收强度, 使用最小均方根方法进行定位, 提出互联多层模型的全局数据融合算法和有强跟踪能力的增强 Kalman 滤波算法[89]。

在相关的应用中, 单轴惯性陀螺仪、里程计和基于红外、微波、射频器件的测量与通信装置得到应用[90]-[92]。

6.3. 冷链低功耗组网技术研究

1) 基于低功耗 RFID 的组网

Antonio Sánchez 等使用低功耗的 RFID 外围集成电路, 可以在备用模式下以 10 uW 功耗、在发送和接收模式下以极低功耗工作[93]; 这种低功耗 RFID 在组网时采用了 CSMA-CA 中的 CCA 机制。

2) 基于低功耗椭圆曲线密码(ECP)加密的 RFID 组网

Zilong Liu 在他们的研究中使用数量少的椭圆曲线密码(ECP)实现 RFID 加密。其中椭圆曲线函数采用(5)式。

$$F(x) = x^{163} + x^7 + x^6 + x^3 + 1 \quad (5)$$

这种 RFID 的面积是 0.12 mm², 在 847.5 KHz 工作时功耗能降到 20.1 μW 工作。这样为 RFID 低功耗组网的安全论证提供一种解决方案[94]。在椭圆曲线密码(ECP)的实现上, certiCom 公司推出了相关软件和一种硬件内核产品。

3) RFID 组网的能量有效

Adnan Nasir 等研究了 RFID 组网的能量有效、和最大化 RFID 链接的信噪比(SNR)方法, 并使用了隐马尔科夫(HMM)、分层隐马尔科夫(HHMM)算法预测接收和事件发生, 来实现低功耗的组网, 等等[94]。

4) RFID 低功耗组网的功率计算

在理论上, Shuenn-Yuh Le 研究了 RFID 的场强和传输功耗问题。他们指出在近场下的 RFID 场强为(6)式, 其中场强为 H , N 是线圈的匝数, r 是与发射源的距离, R 是线圈的直径, I 是电流。

$$H = \frac{INR^2}{2\sqrt{(R^2 + r^2)^3}} \quad (6)$$

远场下, RFID 场强如(7)式, 式中 Z_F 为波阻抗, P_{EIPR} 为发射功率, r 是发射到接收线圈的距离。

$$E = \sqrt{\frac{P_{EIPR} \times Z_F}{4\pi r^2}} \quad (7)$$

传输的功率情况如(8)式

$$\begin{aligned} \alpha_F &= -147.6 + 20\log(r) + 20\log(f) \\ &- G_{rea} - G_{tag} \\ P_{tag} &= \frac{P_{rea}}{10^{\alpha_F/10}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中接收器的功率为 P_{tag} , 发送器功率为 P_{rea} , α_F 为衰减因子, f 是频率, r 是距离, G_{tag} 和 G_{rea} 是接收器和发送器的天线增益[95]。

6.4. 冷链传感器信息与其他系统之间融合

(1) 冷链的后勤辅助系统

Shao-Fan Lien 等基于 Android 开发了后勤辅助修理框架, 这个系统包括四个部分: 智能手机、数据

管理系统、维护支持中心和无线网络等等。

(2) 智能物流追踪系统

孙玉砚等研究了与 GPS、物流管理、外界环境、GIS 融合的智能物流追踪系统；它由监测网络、数据传输网络、远程终端和运输人员 4 个部分构成[96]。

Heinrich Milosiu 在他们研究的“Energy independent Asset Tracking System” (独立能量财产跟踪系统) 项目中使用了唤醒接收器、基于信标的定位方法，并能在多个频率段通信。

(3) 智能物流服务系统

王亦璋等研究了基于 BLE4.0 的无线温度模块、利用手机建立智慧管理平台监控温度的变化。在配置、初始化 1、盘点、运输、货物查找、货物清点、信息下载和电量盘点等几个方面提供行动物流服务[97]。

6.5. 冷链传感器技术的挑战

1) 基于定位技术的无线标签网络

从前面的分析可以看出，目前的智慧冷链 RFID、无线传感网络在定位方面的研究和应用不多，降低了智慧的冷链服务的质量。基于超宽带的智能标签定位、RFID 定位、WSN 定位，在低功耗组网等方面的应用是冷链传感器技术的挑战。

2) 基于无线视频监控技术的冷链服务

冷链网络可视化技术，不但增加了冷链运输的可靠性、可追溯性，也对提高冷链全过程服务质量提供基础。但无线低功耗、低温的网络视频技术是智慧冷链感知技术另一个挑战。

3) 传感器信息与物流管理、GPS、外界环境信息(外部温湿度)等系统之间的智慧融合，以及冷链的低功耗组网也是智慧冷链传感器技术的挑战。

4) 低成本、大数量、性能可靠、测量参数多的传感器在冷链中的应用是冷链物流传感器技术的主要挑战。

7. 结论

随着冷链在社会生活的日益普及，以及人们对食品药品的质量与品质的不懈追求，传感器被越来越多的应用到冷链物流中。

在这种环境下，附带多种检测参数智能 RFID 传感器以不同的制作方式被制造、被完善；MEMS 传感器、微型化传感器应用领域也日益被扩大；这些传感技术推动了智慧化冷链的发展。

而在信息处理与通信方面。超高频的 RFID (433-900 MHz) 的研究进展较大，而与 433 MHz 或 895 MHz 的 RFID 通信协议结合的无线传感网络也得到发展。

同时，成本低、数量大、性能可靠、参数众多、标准不完善、机理复杂等的物流传感器的特征是它们是否能在冷链中的可靠与长期应用的挑战。

致 谢

成都信息工程大学物流工程 09 级的学生参与部分资料的整理工作，其中王愈钧、邓红波、章壮等同学参与了论文的部分资料翻译和总结工作。

基金项目

四川省教育厅重点自然科学基金项目 14Z0172。

参考文献 (References)

- [1] 雷光临, 李俊. 基于物联网技术的智慧物流研究[J]. 物流技术, 2012, 31(8): 393-394.

- [2] 胡晓燕. 基于供应链绩效评定的物流成本评价体系研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(5): 687-689.
- [3] 王璐超, 刘军. 无线传感器网络在物流中应用的关键技术与前景分析[J]. 物流技术, 2010, 29(3): 141-143.
- [4] 毕思远, 李金峰, 徐臻, 等. 无线传感器网络在食品冷链物流监控中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2014(22): 7553-7556.
- [5] 江峰. 无线传感器网络在智能物流中的设计分析[J]. 通信技术, 2013(5): 34-36.
- [6] Laura W. Global Healthcare Cold Chain Logistics Market Report & Forecast (2012-2017). <http://www.wnem.com/story/21987922/global-healthcare-cold-chain-logistics-market-report-forecast-2012-2017>
- [7] Li, K.A., Sohn, T.Y., Huang, S., et al. (2008) PeopleTones: A System for the Detection and Notification of Buddy Proximity on Mobile Phones. *Proc. 6th Int'l. Conf. on Mobile Systems (MobiSys)*, 2008), 160-173.
- [8] He, Y., Liu, Y.H., Shen, X.F., et al. (2013) Noninteractive Localization of Wireless Camera Sensors with Mobile Beacon. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **4**, 333-345.
- [9] Guha, S., Plarre, K., Lissner, D., et al. (2010) AutoWitness: Locating and Tracking Stolen Property While Tolerating GPS and Radio Outages. *ACM Transactions on Sensor Networks*, **8**, 29-42.
- [10] Ionut, C., Bao, X., Mrttin, A., et al. (2010) Did You See Bob?: Human Localization Using Mobile Phones. *Proceedings of ACM MobiCom*, 149-160.
- [11] Bijwaard, D.J.A., van Kleunen, W.A.P., Havinga, P.J.M., Kleiboer, L. and Bijl, M.J.J. (2011) Using Dynamic WSNs in Smart Logistics for Fruits and Pharmacy. *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Seattle, 1-4 November 2011, 218-231.
- [12] Ding, H., Li, R., Li, S., Han, J. and Zhao, J. (2013) MISS: Multi-Dimensional Information Sensing Surveillance for Cold Chain Logistics. *IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, Hangzhou, 14-16 October 2013, 519-523. <http://dx.doi.org/10.1109/mass.2013.87>
- [13] Zoller, S., Reinhardt, A. and Steinmetz, R. (2012) Distributed Data Filtering in Logistics Wireless Sensor Networks Based on Transmission Relevance. *37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN*, Clearwater, 22-25 October 2012, 256-259. <http://dx.doi.org/10.1109/LCN.2012.6423622>
- [14] Tanner, D.J. and Amos, N.D. (2003) Heat and Mass Transfer-Temperature Variability during Shipment of Fresh Produce. *Acta Horticulturae*, **599**, 193-204. <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.599.22>
- [15] Nunes, M., Emand, J. and Brecht, J. (2006) Brief Deviations from Set Point Temperatures during Normal Airport Handling Operations Negatively Affect the Quality of Papaya (*Carica papaya*) Fruit. *Postharvest Biology and Technology*, **41**, 328-340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.04.013>
- [16] Ruiz, G.L. and Lunadei, L. (2010) Monitoring Cold Chain Logistics by Means of RFID. In: Turcu, C., Ed., *Sustainable Radio Frequency Identification Solutions*, INTECH, Vienna, 37-50. <http://dx.doi.org/10.5772/8006>
- [17] Ruiz, G.L., Barreiro, P., Rodriguez, B.J. and Rrbla, J.I. (2007) Monitoring Intermodal Refrigerated Fruit Transport Using Sensor Networks: A Review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, **5**, 142-156. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2007052-234>
- [18] Ruiz, G.L., Barreiro, P. and Rrbla, J.I. (2008) Performance of ZigBee-Based Wireless Sensor Nodes for Real-Time Monitoring of Fruit Logistics. *Journal of Food Engineering*, **87**, 405-415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.033>
- [19] Montero, G.F., Brasa, A. and Montero, F. (2009) Seguimiento de Parámetros Agroambientales en Viñedo mediante Redes Inalámbricas de Sensores. *Proceedings of V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico AGROINGENIERÍA*, Lugo, 28 September 2009.
- [20] Wang, N., Zhang, N.Q. and Wang, M.H. (2006) Wireless Sensors in Agriculture and Food Industry-Recent Development and Future Perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, **50**, 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>
- [21] Craddock, R.J. and Stansfield, E.V. (2005) Sensor Fusion for Smart Containers. *Proceedings of IEEE Seminar on Signal Processing Solutions for Homeland Security*, London, 5-7 April 2005, 5. <http://dx.doi.org/10.1049/ic:20050272>
- [22] Luis, R.G., Pilar, B., Jose, I.R. and Lunadei, L. (2010) Testing ZigBee Motes for Monitoring Refrigerated Vegetable Transportation under Real Conditions. *Sensors*, **10**, 4968-4982. <http://dx.doi.org/10.3390/s100504968>
- [23] Chotykul, N., Perez, L.C. and Torres, J. (2012) Effect of Model Parameter Variability on the Uncertainty of Refrigerated Microbial Shelf-Life Estimates. *Journal of Food Process Engineering*, **35**, 829-839. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00631.x>
- [24] Martinez, M.S., Saldana, M., Torres, J.A. and Kennelly, J.J. (2012) Effect of Pressure-Assisted Thermal Sterilization on Conjugated Linoleic Acid (CLA) Content in CLA-Enriched Milk. *Innovative Food Science & Emerging*

- Technologies*, **16**, 291-297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2012.07.004>
- [25] Gayan, E., Torres, J.A. and Paredes, S.D. (2012) Hurdle Approach to Increase the Microbial Inactivation by High Pressure Processing: Effect of Essential Oils. *Food Engineering Reviews*, **4**, 141-148. <http://dx.doi.org/10.1007/s12393-012-9055-y>
- [26] Escobedo, A.Z., Velazquez, G., Torres, J.A. and Welti-Chanes, J. (2012) Inclusion of the Variability of Model Parameters on Shelf-Life Estimations for Low and Intermediate Moisture Vegetables. *LWT—Food Science and Technology*, **47**, 364-370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.032>
- [27] Segavia, B.K., Ramirez, R., Durst, R., Escobedo-Avellaneda, Z.J., Welti-Chanes, J., Sanz, P.D. and Torres, J.A. (2012) Formation Risk of Toxic Compounds in Pressure-Assisted Thermally Processed Foods. *Journal of Food Science*, **77**, R1-R10. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02451.x>
- [28] Almoacid, M.S. and Torres, J.A. (2010) Uncertainty of Microbial Shelf-Life Estimations for Refrigerated Foods Due to the Experimental Variability of the Model Parameters. *Journal of Food Process Engineering*, **33**, 66-84. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00298.x>
- [29] McNab, W.B. (1998) A General Framework Illustrating an Approach to Quantitative Microbial Food Safety Risk Assessment. *Journal of Food Protection*, **6**, 1216-1228.
- [30] 刘波, 周黎明, 鲁胜利. 电子废物中有害物质的检测及处理. 中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 531-535.
- [31] Srivastava, S.K. (2008) Network Design for Reverse Logistics. *Omega*, **36**, 535-548. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2006.11.012>
- [32] 张峰. 广西电子废弃物回收物流网络构建[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2009.
- [33] 朱道立, 崔益明, 陈姝妮. 逆向物流系统和技术[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2003, 42(5): 673-678.
- [34] 宋亮, 王健, 徐公伟. 再制造逆向物流网络的多周期动态优化模型[J]. 绵阳师范学院学报, 2014, 33(11): 86-95.
- [35] Jedermann, R., Poetsch, T. and Lang, W. (2014) Smart Sensors for the Intelligent Container. 2014 *European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies (Smart SysTech)*, Dortmund, 1-2 July 2014, 1-2. <http://dx.doi.org/10.1109/SmartSysTech.2014.7155752>
- [36] Lee, C.-T., Chang, C.-M., Kao, C.-Y., Tseng, H.-M., Hsu, H., Nien, C.-C., et al. (2014) Smart Insulating Container with Anti-Theft Features by M2M Tracking. 2014 *IEEE International Conference on Internet of Things (iThings), and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom), and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom)*, Taipei, 1-3 September 2014, 140-147. <http://dx.doi.org/10.1109/iThings.2014.29>
- [37] Chou, P.H., Lee, C.T., Peng, Z.Y., Li, J.-P., Lai, T.K., Chang, C.-M., et al. (2013) A Bluetooth-Smart Insulating Container for Cold-Chain Logistics. 2013 *IEEE 6th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA)*, Koloa, 16-18 December 2013, 298-303. <http://dx.doi.org/10.1109/soca.2013.46>
- [38] Carn, J. (2011) Smart Container Management: Creating Value from Real-Time Container Security Device Data. 2011 *IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST)*, Waltham, 15-17 November 2011, 457-465. <http://dx.doi.org/10.1109/THS.2011.6107912>
- [39] Castro, M., Jara, A. and Skarmeta, A. (2011) Analysis of the Future Internet Capabilities for Continuous Temperature Monitoring of Blood Bags in Terrestrial Logistics Systems. *Proceedings of the International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, ICHIT*, Daejeon, 22-24 September 2011, 558-566. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-24082-9_68
- [40] Becker, M., Koojana, K. and Carmelita, G. (2011) The Intelligent Container—Wireless Sensor Networks in Logistics. *Proceedings of 19th ComNets-Workshop*, Aachen, 11 March 2011.
- [41] Diallo, O., Rodrigues, J. and Sene, M. (2011) Real-Time Data Management on Wireless Sensor Networks: A Survey. *Journal of Network and Computer Applications*, **35**, 1013-1021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2011.12.006>
- [42] Shelby, Z., Harke, K., Bormann, C. and Frank, B. (2012) Constrained Application Protocol (CoAP). Internet Draft[R]; IETF CoRE Working Group, 12 March 2012.
- [43] Miguel, C., Antonio, J. and Javo, A. (2012) Architecture for Improving Terrestrial Logistics Based on the Web of Things. *Sensors*, **12**, 6538-6575. <http://dx.doi.org/10.3390/s120506538>
- [44] 李锦, 谢如鹤. 冷藏运输装备技术研究进展[J]. 流体机械, 2014, 42(5): 82-87.
- [45] 肖莹, 刘德军. 农产品冷藏保温运输技术与装备研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(1): 57-60.
- [46] Ruiz, G.L. and Lunadei, L. (2011) The Role of Rfid in Agriculture: Applications, Limitations and Challenges. *Computers & Electronics in Agriculture*, **79**, 42-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2011.08.010>
- [47] Luis, R.G., Loredana, L., Pilar, B. and Robla, I. (2009) A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in

- Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends. *Sensors*, **9**, 4728-4750. <http://dx.doi.org/10.3390/s90604728>
- [48] Lunadei, L., Ruiz, G.L., Bodria, L. and Guidetti, R. (2012) Automatic Identification of Defects on Eggshell through a Multispectral Vision System. *Food & Bioprocess Technology*, **5**, 3042-3050. <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-011-0672-x>
- [49] Lunadei, L., Diezma, B., Lleo, L., Ruiz-Garcia, L., Cantalapiedra, S. and Ruiz-Altisent, M. (2012) Monitoring of Fresh-Cut Spinach Leaves through a Multispectral Vision System. *Postharvest Biology & Technology*, **63**, 74-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.08.004>
- [50] Abad, E., Palacia, F., Nuin, M., de Zárate, A.G., Juarros, A., Gómez, J.M. and Marco, S. (2009) RFID Smart Tag for Traceability and Cold Chain Monitoring of Foods: Demonstration in an Intercontinental Fresh Fish Logistic Chain. *Journal of Food Engineering*, **93**, 394-399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.004>
- [51] Mattoli, V., Mazzolai, B., Mondini, A., Zampolli, S. and Dario, P. (2010) Flexible Tag Datalogger for Food Logistics. *Sensors and Actuators A: Physical*, **162**, 316-323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2010.01.028>
- [52] Stainberg, M.D., Kassal, P., Tkalec, B. and Steinberg, I.M. (2014) Miniaturised Wireless Smart Tag for Optical Chemical Analysis Applications. *Talanta*, **118**, 375-381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2013.10.033>
- [53] Oprea, A., Courbat, J., Barsan, N., Briand, D., de Rooij, N.F. and Weimar, U. (2009) Temperature, Humidity and Gas Sensors Integrated on Plastic Foil for Low Power Applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **140**, 227-232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2009.04.019>
- [54] Zampolli, S., Elmi, I., Cozzani, E., Cardinali, G.C., Scorzoni, A., Cicioni, M., *et al.* (2007) Ultra-Low-Power Components for an RFID Tag with Physical and Chemical Sensors. *Microsystem Technologies*, **14**, 581-588. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-007-0444-8>
- [55] Kassal, P., Steinberg, I.M. and Steinberg, M.D. (2013) Wireless Smart Tag with Potentiometric Input for Ultra-Low-Power Chemical Sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **184**, 254-259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2013.04.049>
- [56] Fernandez, I., Asensio, A., Gutierrez, I., Garcia, J., Rebollo, I. and de No, J. (2012) Study of the Communication Distance of a MEMS Pressure Sensor Integrated in a RFID Passive Tag. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, **12**, 15-18. <http://dx.doi.org/10.4316/aece.2012.01003>
- [57] Salmeron, J.F., Molina, L.F., Rivadeneyra, A., Vasquez Quintero, A., Capitan-Vallvey, L.F., de Rooij, N.F., *et al.* (2014) Design and Development of Sensing RFID Tags on Flexible Foil Compatible with EPC Gen 2. *IEEE Sensors Journal*, **14**, 4361-4371. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2014.2335417>
- [58] Yang, L., Rida, A. and Tentzeris, M.M. (2009) Design and Development of Radio Frequency Identification (RFID) and RFID-Enabled Sensors on Flexible Low Cost Substrates. Vol. 1, Morgan & Claypool Publishers, San Rafael, 1-89. <http://dx.doi.org/10.2200/s00172ed1v01y200905mrf001>
- [59] Wu, X., Deng, F., Hao, Y., Fu, Z. and Zhang, L. (2015) Design of a Humidity Sensor Tag for Passive Wireless Applications. *Sensors*, **15**, 25564-25576. <http://dx.doi.org/10.3390/s151025564>
- [60] Briand, D., Molina-Lopez, F., Quintero, A.V., Mattana, G. and de Rooij, N.F. (2012) Printed Sensors on Smart RFID Labels for Logistics. 2012 *IEEE 10th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, Montreal, 17-20 June 2012, 449-452. <http://dx.doi.org/10.1109/NEWCAS.2012.6329053>
- [61] Abad, E., Zampolli, S., Marco, S., Scorzoni, A., Mazzolai, B., Juarros, A., Gómez, D., Elmi, I., Cardinali, G.C., Gómez, J.M., Palacio, F., Cicioni, M., Mondini, A., Becker, T. and Sayhan, I. (2007) Flexible Tag Microlab Development: Gas Sensors Integration in RFID Flexible Tags for Food Logistic. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **127**, 2-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2007.07.007>
- [62] Oprea, A., Barsan, N., Weimar, U., Bauersfeld, M.-L., Ebling, D. and Wöllenstein, J. (2008) Capacitive Humidity Sensors on Flexible RFID Labels. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **132**, 404-410. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2007.10.010>
- [63] Zampetti, E., Maiolo, L., Pecora, A., Maita, F., Pantalei, S., Minotti, A., *et al.* (2011) Flexible Sensorial System Based on Capacitive Chemical Sensors Integrated with Readout Circuits Fully Fabricated on Ultra Thin Substrate. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **155**, 768-774. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2011.01.045>
- [64] Virtanen, J., Ukkonen, L., Bjorninen, T., Elsherbeni, A.Z. and Sydänheimo, L. (2011) Inkjet-Printed Humidity Sensor for Passive UHF RFID Systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **60**, 2769-2777. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2011.2130070>
- [65] Vyas, R., Lakafosis, V., Rida, A., Chaisilwattana, N., Travis, S., Pan, J., *et al.* (2009) Paper-Based RFID-Enabled Wireless Platforms for Sensing Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **57**, 1370-1382. <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2009.2017317>
- [66] Briand, D., Oprea, A., Courbat, J. and Bârsan, N. (2011) Making Environmental Sensors on Plastic Foil. *Materials*

- Today*, **14**, 416-423. [http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70186-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70186-9)
- [67] Molina, L.F., Briand, D. and Rooij, N. (2012) All Additive Inkjet Printed Humidity Sensors on Plastic Substrate. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **166-167**, 212-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2012.02.042>
- [68] Courbat, J., Briand, D., Yue, L., Raible, S. and de Rooij, N.F. (2012) Drop-Coated Metal-Oxide Gas Sensor on Polyimide Foil with Reduced Power Consumption for Wireless Applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **161**, 862-868. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2011.11.050>
- [69] Courbat, J., Briand, D., Wollenstein, J. and de Rooij, N.F. (2011) Polymeric Foil Optical Waveguide with Inkjet Printed Gas Sensitive Film for Colorimetric Sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **160**, 910-915. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2011.09.001>
- [70] Oprea, A., Courbat, J., Barsan, N., Briand, D., de Rooij, N.F. and Weimar, U. (2009) Temperature, Humidity and Gas Sensors Integrated on Plastic Foil for Low-Power Applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **140**, 227-232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2009.04.019>
- [71] Molina, L.F., Vasquez Quintero, A., Mattana, G., Briand, D. and de Rooij, N.F. (2012) All-Additive Inkjet Printed Humidity and Temperature Sensors Fabricated and Encapsulated at Foil Level. *The 14th International Meeting on Chemical Sensors, IMCS 2012*, Nürnberg, 20-23 May 2012, 1122-1125.
- [72] Fernández-Salmerón, J., Rivadeneyra, A., Martínez-Martí, F., Capitán-Vallvey, L.F., Palma, A.J. and Carvajal, M.A. (2015) Alberto J. Palma and Miguel A. Carvajal. Passive UHF RFID Tag with Multiple Sensing Capabilities. *Sensors*, **15**, 26769-26782. <http://dx.doi.org/10.3390/s151026769>
- [73] Kandhai, M.C., Breeuwer, P., Gorris, L.G., Zwietering, M.H. and Reij, M.W. (2009) Growth of *Cronobacter* spp. under Dynamic Temperature Conditions Occurring during Cooling of Reconstituted Powdered Infant Formula. *Journal of Food Protection*, **72**, 2489-2498.
- [74] Wood, R. (1993) Deterministic Network Interdiction. *Mathematical and Computer Modelling*, **17**, 1-18. [http://dx.doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90236-R](http://dx.doi.org/10.1016/0895-7177(93)90236-R)
- [75] Israeli, E. and Wood, R. (2002) Shortest-Path Network Interdiction. *Networks*, **40**, 97-111. <http://dx.doi.org/10.1002/net.10039>
- [76] Dimitrov, N., Gonzalez, M.A., Michalopoulos, D.P., Morton, D.P., Nehme, M.V., Popova, E., Schneider, E.A. and Thoreson, G.G. (2008) Interdiction Modeling for Smuggled Nuclear Material. *Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management*, Nashville, 13-17 July 2008.
- [77] Jay, P., Jeffrey, T. and Zhou, X. (2010) Locating Sensors for Detecting Source-to-Target Patterns of Special Nuclear Material Smuggling: A Spatial Information Theoretic Approach. *Sensors*, **10**, 8070-8091. <http://dx.doi.org/10.3390/s100908070>
- [78] Xu, H., Zhu, J. and Wang, B. (2015) On the Deployment of a Connected Sensor Network for Confidential Information Coverage. *Sensors*, **15**, 11277-11294. <http://dx.doi.org/10.3390/s150511277>
- [79] Gonzalez, H., Han, J., Li, X. and Klabjan, D. (2006) Warehousing and Analyzing Massive RFID Data Sets. *Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering*, Atlanta, 3-7 April 2006, 83-92.
- [80] Darcy, P., Pupunwiwat, P. and Stantic, B. (2011) The Challenges and Issues Facing the Deployment of RFID Technology. In: Turcu, C., Ed., *Deploying RFID—Challenges, Solutions, and Open Issues*, 1st Edition, InTech, Rijeka, 1-28. <http://dx.doi.org/10.5772/16986>
- [81] Chun, H.L. and Chin, W.C. (2011) RFID Data Processing in Supply Chain Management Using a Path Encoding Scheme. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, **23**, 742-758. <http://dx.doi.org/10.1109/TKDE.2010.136>
- [82] Mahdin, H. and Abawajy, J. (2010) An Approach to Filtering Duplicate RFID Data Streams. In: Kim, T.-H., Ma, J., Fang, W.-C., Park, B., Kang, B.-H. and Slezak, D., Eds., *U- and E-Service, Science and Technology*, Vol. 124, Springer, Berlin/Heidelberg, 125-133. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-17644-9_14
- [83] Gonzalez, H., Han, J.W., Cheng, H., Li, X.L., Klabjan, D. and Wu, T.Y. (2010) Modeling Massive RFID Data Sets: A Gateway-Based Movement Graph Approach. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, **22**, 90-104. <http://dx.doi.org/10.1109/TKDE.2009.61>
- [84] Bashir, A.K., Lim, S.J., Hussain, C. and Park, M.S. (2011) Energy Efficient In-Network RFID Data Filtering Scheme in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, **11**, 7004-7021. <http://dx.doi.org/10.3390/s110707004>
- [85] Bai, Y., Wang, F., Liu, P., Zaniolo, C. and Liu, S. (2007) RFID Data Processing with a Data Stream Query Language. *Proceedings of the 23rd International Conference on Data Engineering*, Istanbul, 15-20 April 2007, 1184-1193. <http://dx.doi.org/10.1109/icde.2007.368977>
- [86] Park, J., Hong, B. and Ban, C. (2009) An Efficient Query Index on RFID Streaming Data. *Journal of Information Science and Engineering*, **25**, 921-935.

- [87] Fan, H., Wu, Q., Lin, Y. and Zhang, J. (2013) A Split-Path Schema-Based RFID Data Storage Model in Supply Chain Management. *Sensors*, **13**, 5757-5776. <http://dx.doi.org/10.3390/s130505757>
- [88] Ki, H.E., Seuong, J.L., Yeo, S.K., Lee, C.W., Kim, M.C. and Jung, K.K. (2011) Improved Kalman Filter Method for Measurement Noise Reduction in Multi Sensor RFID Systems. *Sensors*, **11**, 10266-10282. <http://dx.doi.org/10.3390/s111110266>
- [89] Song, X., Li, X., Tang, W., Zhang, W. and Li, B. (2014) A Hybrid Positioning Strategy for Vehicles in a Tunnel Based on RFID and In-Vehicle Sensors. *Sensors*, **14**, 23095-23118. <http://dx.doi.org/10.3390/s141223095>
- [90] 刘茂旭, 何怡刚, 邓芳明, 李兵, 张利华, 吴翔. 融合 RFID 的无线湿度传感器节点设计研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1171-1178.
- [91] 于洁潇, 刘开华, 史伟光. RFID 多跳邻域定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2680-2687.
- [92] 余开, 何怡刚, 李兵, 侯周国, 朱彦卿. 无源超高频 RFID 系统链路预算分析[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 974-979.
- [93] Antonio, S., Sara, B., Pedro, Y., Perles, A. and Serrano, J.J. (2012) An Ultra-Low Power and Flexible Acoustic Modem Design to Develop Energy-Efficient Underwater Sensor Networks. *Sensors*, **12**, 6837-6856. <http://dx.doi.org/10.3390/s120606837>
- [94] Liu, Z., Liu, D., Zou, X., Lin, H. and Cheng, J. (2014) Design of an Elliptic Curve Cryptography Processor for RFID Tag Chips. *Sensors*, **14**, 17883-17904. <http://dx.doi.org/10.3390/s141017883>
- [95] Lee, S., Wang, L. and Fang, Q. (2010) A Low-Power RFID Integrated Circuits for Intelligent Healthcare Systems. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, **14**, 1387-1396. <http://dx.doi.org/10.1109/TITB.2010.2053942>
- [96] Lien, S.-F., Wang, C.-C., Su, J.-P., Chen, H.-M. and Wu, C.-H. (2014) Android Platform Based Smartphones for a Logistical Remote Association Repair Framework. *Sensors*, **14**, 11278-11292. <http://dx.doi.org/10.3390/s140711278>
- [97] 王亦璋, 陈一元, Hung Shang-Chih. 基于云端感测科技之智能物流服务系统[J]. 服务科学和管理, 2015, 4(4): 87-96.