

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.003

基于 LoRa 网关的中继选择优化算法研究

胡悦¹, 孙云晓², 李岩², 王祥², 王霞², 郭雅娟²

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 210100;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:随着电力物联网的建设推进,配电网面临着巨大的挑战。作为电力系统的末端,配电网直接面向大量实际用电群体,其客户体验满意度和供电运行可靠度备受关注。为改善 LoRaWAN 网络架构中,终端节点移动造成的信号错误传播以及高能耗问题,在混合译码放大转发(HDAF)方式下,给出一种基于 LoRa 网关的无线中继优化算法。该算法中,LoRa 网关具备中继转发功能,基于节点间的位置关系,推导了 HDAF 方式下的误码率(SER)表达式。构造 Lagrange 函数,在 SER 约束的 KKT 极值条件下,给出最佳功率分配方案。数值分析表明:同等条件下,所给方案对放大转发(AF)、译码转发(DF)方式做出优化,降低了其误码率。各节点消耗的系统功率比 AF、DF 方式低,节省了配电网中的系统能耗。

关键词:LoRa;混合译码放大转发(HDAF);功率分配;中继选择;误码率

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0013-06

0 引言

在工业物联网(industrial internet of things, IIoT)系统中引入工业网络是相当具有挑战性的^[1]。IIoT 目前考虑的一种新型无线网络是低功耗广域网(low-power wide-area network, LPWAN)^[2-3],该网络最初是为智能计量、远程监控和智能城市等应用而设计的,得益于其通信强大、覆盖范围广和低功耗等特点^[4],LoRaWAN 被广泛地应用于国内大范围智慧能源和公用事业,在未来的电力物联网领域会发挥更大效用。

当前,配电网与互联网技术不断融合的传统产业越来越多^[5],这得益于大数据、云计算、物联网和人工智能等新一代前沿信息科技在互联网技术中的巧妙应用^[6]。在新一轮电力物联网建设中,配电网是适合迅速试点及推广的重要组成^[7],在配电领域中,电力物联网与智能电网深度融合,正是对这一趋势的积极响应。

LoRa 是由 Semtech 公司^[8]申请专利的无线通信技术,分为两部分:物理层 LoRa 及其上层 LoRaWAN。LoRa 和 LoRaWAN 的结合使远间隔传输的消耗大大下降。在 LoRaWAN 网络内面临的一个重要课题就是中继协议的选择。通过不断地技术改造,智能电网中将部署大量的传感器单元,采用 LoRa 通信。这些传感器单元一般采用低功耗设备,通信距离通常较小^[9],但在部分场景中,比如智

能配电房或者范围较长的架空线路,需要较大区域内的通信连接,此时中继节点扮演了重要的角色。中继节点若通过放大转发^[10](amplify-and-forward, AF),可放大有效信号,但噪声也被放大。若通过译码转发^[10](decode-and-forward, DF),中继节点译码有延时易形成信号传播偏差。可见,根据信道质量,选择最优的协作模式可以有效提高系统性能。混合译码放大前传^[10](hybrid decode-amplify-and-orward, HDAF)不仅可以采用 AF 方式获取分集增益,而且能够规避 DF 方式产生的差错传播。基于 LoRa 的中继技术研究集中在终端,但终端节点功耗和接收能力受限,不适合长时间进行大量数据转发,且同时仅能监听一个信道中特定扩频因子条件下的 LoRa 射频信号。而网关架设地点一般供电充足,支持多信道接收,采用高主频处理芯片,可支持大数据处理及转发。

文中 LoRa 无线中继技术是在电力物联网中基于网关实现的。在最佳中继节点选择的前提下,联合优化误码率^[11](symbol-error-rate, SER)及功率分配。该算法在保证低误码率的前提下,进行了中继低功耗优化,对工程实践有较强的指导意义和应用价值。

1 基于 LoRa 网关的无线中继网络模型

在 LoRaWAN 网络通信环境中,随机分布着一些网关(也可称为基站),以及基础设施信号覆盖范围内运行的一些终端设备。在配电网中,该终端能够实现现在设备运行环境下感知单元状态、执行主体

收稿日期:2020-05-05;修回日期:2020-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61701167)

控制命令、辅助采集基础数据信息以及与电力系统用户形成良好双向友好互动,实现精益化业务维护等功能^[12]。将源节点 LoRa 服务器简化为 S , N 个网关简化为 R , 终端简化为 D , 建立基于 LoRa 网关的无线中继网络模型见图 1。经过中继选择策略选出的最佳中继 R_k 参与最终协作传输。系统中包含源节点 S , N 个候选中继节点 $R_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 1 个终端节点 D 。假定模型中各节点之间信道彼此独立, 满足准静态瑞利衰落分布, 发射机已知信道状态信息(channel state information, CSI)。为保证半双工通信, 源节点频带服从正交频分复用^[13]。各源节点的工作方式采用半双工, 调制方式为多相制(multiple phase shift keying, MPSK)。

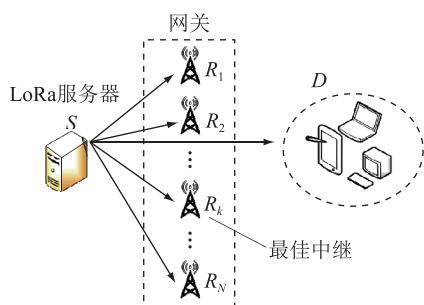


图 1 基于 LoRa 网关的无线中继网络模型

Fig.1 Wireless relay network model based on LoRa gateway

在第一时隙, LoRa 服务器节点 S 作为源节点广播消息 x , N 个候选 R 和终端节点 D 接收来自 S 的信息。

$$y_{SD} = \sqrt{P_S} h_{SD} x + n_{SD} \quad (1)$$

$$y_{SR_i} = \sqrt{P_S} h_{SR_i} x + n_{SR_i} \quad (2)$$

式中: y_{SD} , y_{SR_i} 分别为终端节点 D 和网关中继节点 R_i 接收到的信号; P_S 为 LoRa 服务器节点 S 发射功率; h_{SD} , h_{SR_i} 分别为 LoRa 服务器节点 S 发送到终端节点 D 和网关中继节点 R_i 的信道增益^[14], 服从数学期望为 0, 方差为 Ω_{SD} 和 Ω_{SR_i} 的复高斯分布; n_{SD} , n_{SR_i} 分别为均值为 0, 方差为 σ_{SD}^2 和 $\sigma_{SR_i}^2$ 的加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN)。

第二阶段, 源节点不发送任何信息。在 N 个候选网关中继节点 R_i 里筛选出瞬时信噪比最大的作为最佳中继 $R_k (k = 1, 2, \dots, n, n \leq N)$, 处理并转发接收到的 LoRa 服务器源节点信息。

$$y_{R,D} = \sqrt{P_{R_i}} h_{R_i,D} \hat{x} + n_{R,D} \quad (3)$$

$$R_k = \operatorname{argmax}_i \quad (4)$$

式中: $y_{R,D}$ 为终端节点 D 接收到网关中继节点 R_i 转发的信号; P_{R_i} 为 R_i 的发射功率; $h_{R_i,D}$ 为 R_i 到终端节点 D 的信道增益, 服从数学期望为 0, 方差为 $\Omega_{R,D}$ 的

复高斯分布; \hat{x} 为经过网关中继 R_i 接收处理后的信息; $n_{R,D}$ 为网关中继 R_i 到终端节点 D 的均值为 0, 方差为 $\sigma_{R,D}^2$ 的 AWGN。为便于分析, 设定 $\sigma_{SD}^2 = \sigma_{SR_i}^2 = \sigma_{R,D}^2 = \sigma_n^2$ 。

最后, 终端节点 D 通过最大比合并(maximum ratio combining, MRC)对两时隙接收到的数据进行处理, 并对系统的中断概率进行计算。根据算法选取最佳中继集合, 计算其功率配比。目的节点合并信号的表达式为^[15]:

$$y = \frac{\sqrt{P_S} h_{SD}^*}{n_{SD}} y_{SD} + \frac{\sqrt{P_{R_i}} h_{R_i,D}^*}{n_{R,D}} y_{R_i,D} \quad (5)$$

式中: h_{SD}^* , $h_{R_i,D}^*$ 分别为 h_{SD} , $h_{R_i,D}$ 的共轭复数。

2 LoRa 无线中继系统性能研究

2.1 最佳中继选择

2.1.1 AF 方式的误码率分析

采用 AF 方式时, 网关放大接收到的信号。选取候选网关中瞬时信噪比最大的网关进行信号转发^[16], 即:

$$R_k = \operatorname{argmax}_i \frac{\gamma_{SR_i} \gamma_{R_i,D}}{\gamma_{SR_i} + \gamma_{R_i,D} + 1} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \gamma_{SD} = \frac{P_S |h_{SD}|^2}{\sigma_n^2} \\ \gamma_{SR_i} = \frac{P_S |h_{SR_i}|^2}{\sigma_n^2} \\ \gamma_{R_i,D} = \frac{P_{R_i} |h_{R_i,D}|^2}{\sigma_n^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: 终端节点 D 对 S - D 直接传输链路和 R - D 传输链路中的信息通过 MRC^[17] 技术进行处理, 得到接收信噪比为:

$$\gamma_{AF} = \gamma_{SD} + \max_i \frac{P_S P_{R_i} |h_{SR_i}|^2 |h_{R_i,D}|^2}{(P_S |h_{SR_i}|^2 + P_{R_i} |h_{R_i,D}|^2 + \sigma_n^2) \sigma_n^2} \quad (8)$$

此时, 在高信噪比条件下, 得到 AF 方式的误码率为^[12]:

$$P_{AF, SER} \approx \frac{\xi^{(n)}}{\pi P_S \Omega_{SD}} \left(\frac{\sigma_n^2}{b} \right)^{n+1} \left(\frac{1}{P_S \Omega_{SR_k}} + \frac{1}{P_{R_k} \Omega_{R_k,D}} \right)^n \quad (9)$$

其中:

$$b = \sin^2(\pi/M) \quad (10)$$

2.1.2 DF 方式的误码率分析

若 R_i 译码准确, 通过固定译码方式进行转发; 否则, 转化为直接传输方式。在能够正确译码 S 信

息的 R_i 里,选定信噪比最大的 R_i 转发其数据。

$$R_k = \operatorname{argmax}_i (\max_{i \in D_m} \gamma_{SD}, \max_{i \in D_m} \gamma_{R_i D}) \quad (11)$$

其中终端节点 D_m 是能准确译码 LoRa 服务器节点 S 信息的网关中继 R_i 集合。终端节点 D 采用 MRC 技术,接收信噪比为:

$$\gamma_{DF} = \gamma_{SD} + \max_{i \in D_m} \left(\max_{i \in D_m} \frac{P_S |h_{SD}|^2}{\sigma_n^2}, \max_{i \in D_m} \frac{P_{R_i} |h_{R_i D}|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (12)$$

在高信噪比条件下的 DF 方式误码率为^[12]:

$$P_{DF, SER} \approx \frac{1}{\pi P_S \Omega_{SD}} \left(\frac{\sigma_n^2}{b} \right)^{n+1} \left[\sum_{m=1}^n \binom{n}{m} \left(1 - \frac{\beta}{\pi b P_S \Omega_{SR_k}} \right)^m \times \left(\frac{\beta}{\pi P_S \Omega_{SR_k}} \right)^{n-m} \frac{\xi^{(m)}}{(P_{R_k} \Omega_{R_k D})^m} + \frac{\beta^{n+1}}{(\pi P_S \Omega_{SR_k})^n} \right] \quad (13)$$

其中:

$$\beta = \int_0^{\frac{\pi(M-1)}{M}} \sin^2 \theta d\theta \quad (14)$$

2.1.3 HDAF 方式的误码率分析

在实践中,AF 方式中继选择的显著特点是放大了源节点发送的信息的同时也放大了噪声,易造成噪声传播。DF 方式在信噪比较低时,循环冗余检查(cyclic redundancy check, CRC)会消耗大量频谱效率,使系统自由度下降,如果译码错误,将造成错误的传播。HDAF^[10] 方式既可通过 AF 实现分集增益,又可避免 DF 差错传播的不足,即当网关节点准确解码,通过 DF 方式,否则网关改用 AF 方式。

从候选网关中选定最大信噪比的 R_i 作为最优网关中继:

$$R_k = \operatorname{argmax}_i \left(\max_{i \in D_m} \gamma_{R_i D}, \max_{i \in D_m} \frac{\gamma_{SR_i} \gamma_{R_i D}}{\gamma_{SR_i} + \gamma_{R_i D} + 1} \right) \quad (15)$$

终端节点 D 利用 MRC 方法将第一时隙 LoRa 服务器源节点 S 节点的直传信号与第二时隙最佳 R_i 转发的信号共同接收,其信噪比为:

$$\gamma_{HDAF} = \gamma_{SD} + \max_i \left(\max_{i \in D_m} \frac{P_S P_{R_i} |h_{SR_i}|^2 |h_{R_i D}|^2}{(P_S |h_{SR_i}|^2 + P_{R_i} |h_{R_i D}|^2 + \sigma_n^2) \sigma_n^2}, \max_{i \in D_m} \frac{P_{R_i} |h_{R_i D}|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (16)$$

在高信噪比的条件下, HDAF 方式的误码率为^[18]:

$$P_{HDAF, SER} \approx$$

$$\frac{\xi^{(n)}}{\pi P_S \Omega_{SD}} \left(\frac{\sigma_n^2}{b} \right)^{n+1} \left[\sum_{m=1}^n \binom{n}{m} \left(1 - \frac{\beta \sigma_n^2}{\pi b P_S \Omega_{SR_k}} \right)^m \times \left(\frac{\beta \sigma_n^2}{\pi b P_S \Omega_{SR_k}} \right)^{n-m} \left(\frac{1}{P_{R_k} \Omega_{R_k D}} \right)^m \left(\frac{1}{P_S \Omega_{SR_k}} + \frac{1}{P_{R_k} \Omega_{R_k D}} \right)^{n-m} + \left(\frac{\beta \sigma_n^2}{\pi b P_S \Omega_{SR_k}} \right)^n \left(\frac{1}{P_S \Omega_{SR_k}} + \frac{1}{P_{R_k} \Omega_{R_k D}} \right)^n \right] \quad (17)$$

2.2 功率分配

2.2.1 直接传输方式

根据 SER 的性能可推导出一个确切的封闭形式的 SER 表达式,并且能得出一个简单的计算自适应阈值的上限。当 S - D 链路采用直接传输方式进行通信时,系统误码率为:

$$P_{\text{direct, SER}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi(M-1)}{M}} e^{-\frac{b \gamma_{SD}}{\sin^2 \theta}} d\theta \approx \frac{\beta \sigma_n^2}{\pi b P_{\text{direct, S}} \Omega_{SD}} \quad (18)$$

当协作传输的系统总功率小于直接传输方式时才有意义,反之,则选用直传方式。令误码率的约束条件值为 λ ,且各种中继方式均满足式(19)。

$$P_{\text{coop, SER}} \leq P_{\text{direct, SER}} = \frac{\beta \sigma_n^2}{\pi b P_{\text{direct, S}} \Omega_{SD}} = \lambda \quad (19)$$

$P_{\text{coop, SER}}$ 为协作通信时的误码率。由式(19)知, λ 与 $P_{\text{direct, S}}$ 成反比,随着 $P_{\text{direct, S}}$ 增大而变小,所以为了合理地减小误码率和系统总功率,可以通过调节功率分配来获得。同时各节点满足:

$$0 < P_{\text{coop, S}} \leq P_{\text{max}} \quad (20)$$

$$0 < P_{\text{coop, R}_i} \leq P_{\text{max}} \quad (21)$$

$P_{\text{coop, S}}$, $P_{\text{coop, R}_i}$ 分别为协作传输时 LoRa 服务器源节点 S 和网关中继 R_i 的功率。为符合误码率的约束条件,要对 S 和 R_i 采取功率分配^[19]。

2.2.2 放大转发方式

在符合误码率约束情况下,单个中继使用 AF 方式时的误码率为^[20]:

$$P_{AF, SER} \approx \frac{\xi^{(1)}}{\pi P_{AF, S} \Omega_{SD}} \left(\frac{\sigma_n^2}{b} \right)^2 \left(\frac{1}{P_{AF, S} \Omega_{SR_i}} + \frac{1}{P_{AF, R_i} \Omega_{RD}} \right) \leq \lambda \quad (22)$$

式(22)经化简可得中继节点功率的约束值。由于 LoRa 服务器节点 S 和 R_i 的总功率为 $P_{AF} = P_{AF, S} + P_{AF, R_i}$ 。对 $P_{AF, S}$ 求偏导数,并令其值为 0,可最小化总功率。得到 LoRa 服务器源节点的发射功率后,则网关中继 R_i 的最小发射功率为:

$$P_{AF, R_i} = \frac{2\Omega_{SR_i}}{\Omega_{SR_i} + 4\sqrt{\Omega_{SR_i}^2 + 8\Omega_{SR_i} \Omega_{RD}}} \times \sqrt{\frac{\xi^{(1)} \sigma_n^4 (\Omega_{SR_i} + 2\Omega_{RD}) + 2\xi^{(1)} \sigma_n^4 \sqrt{\Omega_{SR_i}^2 + 8\Omega_{SR_i} \Omega_{RD}}}{2\lambda \pi b^2 \Omega_{SR_i} \Omega_{RD} \Omega_{SD}}} \quad (23)$$

2.2.3 译码转发方式

在符合误码率约束情况下,单个中继使用 DF 方式时的误码率为:

$$P_{DF,SER} \approx \left[\left(1 - \frac{\beta}{\pi b P_{DF,S} \Omega_{SR_i}} \right) \frac{\xi^{(1)}}{P_{DF,R_i} \Omega_{R_i D}} + \frac{\beta^2}{\pi P_{DF,S} \Omega_{SR_i}} \right] \times \frac{1}{\pi P_{DF,S} \Omega_{SD}} \left(\frac{\sigma_n^2}{b} \right)^2 \leq \lambda \quad (24)$$

化简式(24)可得中继节点功率的约束值。由于 LoRa 服务器节点 S 和网关中继 R_i 的总功率表示为 $P_{DF} = P_{DF,S} + P_{DF,R_i}$ 。对 $P_{DF,S}$ 求偏导数,并令其值为 0,可最小化总功率,LoRa 服务器节点 S 的发射功率:

$$P_{DF,S} = \frac{\sigma_n^2}{b} \sqrt{\frac{\pi b \xi^{(1)} \Omega_{SR_i} + 2 \Omega_{R_i D} \beta^2}{\lambda \pi \Omega_{SD} \Omega_{R_i D} \Omega_{SR_i}}} \quad (25)$$

由文献[13]中方案可知,把式(25)代入式(24)中得出网关中继 R_i 的最小发射功率:

$$P_{DF,R_i} = \frac{2 \sigma_n^6}{\pi b^2} \sqrt{\frac{\pi b \xi^{(1)} \Omega_{SR_i} + 2 \Omega_{R_i D} \beta^2}{\lambda \pi \Omega_{SD} \Omega_{R_i D} \Omega_{SR_i}}} - \frac{2 \sigma_n^4 \beta}{\pi b^2 \Omega_{SR_i}} \quad (26)$$

2.2.4 混合译码放大转发

在符合误码率约束情况下,单个中继使用 HDAF 方式时的误码率为:

$$P_{HDAF,SER} \approx \frac{\xi^{(1)}}{\pi P_{HDAF,S} \Omega_{SD}} \left(\frac{\sigma_n^2}{b} \right)^2 \left(1 - \frac{\beta \sigma_n^2}{\pi b P_{HDAF,S} \Omega_{SR_i}} \right) \frac{1}{P_{HDAF,R_i} \Omega_{R_i D}} + \frac{\beta \sigma_n^2}{\pi b P_{HDAF,S} \Omega_{SR_i}} \left(\frac{1}{P_{HDAF,S} \Omega_{SR_i}} + \frac{1}{P_{HDAF,R_i} \Omega_{R_i D}} \right) \leq \lambda \quad (27)$$

化简式(27)可得网关中继节点功率的约束值:

$$P_{HDAF,R_i} \geq \frac{\pi b \sigma_n^2 \Omega_{SR_i} (\xi^{(1)} \sigma_n^2 \Omega_{SR_i} + \beta b \Omega_{SD}) P_{HDAF,S} - \xi^{(1)} \beta \sigma_n^6 \Omega_{SR_i}}{\pi b^2 \Omega_{SD} \Omega_{R_i D} (\pi b \lambda \Omega_{SR_i}^2 P_{HDAF,S}^2 - \beta \sigma_n^2)} \quad (28)$$

由于 $\pi b \lambda \Omega_{SR_i}^2 P_{HDAF,S}^2 \gg \beta \sigma_n^2$,式(28)中可以忽略 $\beta \sigma_n^2$ 这一项,即:

$$P_{HDAF,R_i} \geq \frac{\sigma_n^4 (\xi^{(1)} \Omega_{SR_i} + \beta b \Omega_{SD})}{\lambda \pi b^2 \Omega_{SD} \Omega_{R_i D} \Omega_{SR_i} P_{HDAF,S}} \quad (29)$$

由于 LoRa 服务器源节点 S 和网关中继 R_i 的总功率表示为 $P_{HDAF} = P_{HDAF,S} + P_{HDAF,R_i}$ 。对 $P_{HDAF,S}$ 求偏导数,并令其值为 0,可最小化总功率。可以得到 LoRa 服务器源节点的发射功率:

$$P_{HDAF,S} = \frac{\sigma_n^2}{b} \sqrt{\frac{\xi^{(1)} \Omega_{SR_i} + b \Omega_{SD}}{\pi \lambda \Omega_{SD} \Omega_{R_i D} \Omega_{SR_i}}} \quad (30)$$

将式(30)代入式(29),则网关中继 R_i 的最小发射功率:

$$P_{HDAF,R_i} = \frac{\sigma_n^2}{b} \sqrt{\frac{\pi \lambda \Omega_{SD} \Omega_{R_i D} \Omega_{SR_i}}{\xi^{(1)} \Omega_{SR_i} + b \Omega_{SD}}} \quad (31)$$

3 仿真结果与数值分析

仿真实验平台为 Matlab,系统采用 M-PSK 调制,取 $M = 16$,S-D 链路信道噪声方差 $\sigma_n^2 = 1$ 。

图 2 为 4 种中继选择方法下的误码率。根据普适性问题,令 LoRa 服务器节点 S 在平面坐标系的区间为 $(-0.5, 0)$,终端节点 D 的区间为 $(0.5, 0)$,以原点为中心的单位圆内随机产生 3 个候选网关中继 R_i ,且不与 LoRa 服务器节点 S 和终端节点 D 重合。设信道的衰落因子 $\alpha = 4$ 。由图 2 可知,信噪比较高时,直接传输方式下的误码率比协作方式下的数值高。令信噪比数值为 15 dB,4 种中继选择方法下的误码率升序排列依次为 2.68×10^{-6} , 2.12×10^{-4} , 9.65×10^{-4} 和 3.91×10^{-3} 。可见信噪比较高时,文中采用的 HDAF 方式中继选择算法得到的误码率数值最小,系统性能最优。

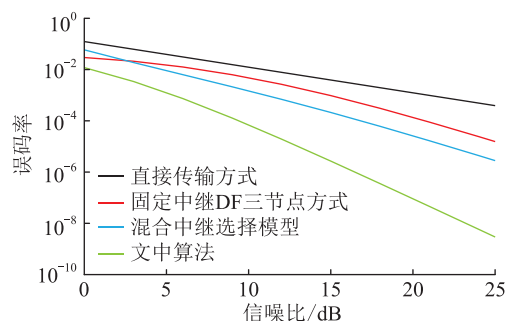


图 2 不同中继选择方法下的性能比较

Fig.2 Performance comparison of different relay selection methods

图 3 为 3 种协作即 AF、DF 和 HDAF 方式下使用相同的功率分配算法后系统误码率的情况。设 $\Omega_{SD} = \Omega_{R_i D} = \Omega_{SR_i} = 1, N = 1$ 。

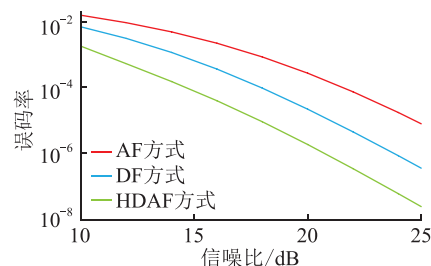


图 3 信噪比随误码率准确值的变化

Fig.3 The change of SNR with the exact value of bit error rate

图 3 中,在一定区间内,误码率随着信噪比的提高不断减小。信噪比较高的情况下,HDAF 方式的误码率最小,性能最优。其次是 DF 方式,AF 方式效果相对较差。可见,HDAF 协作方式得到的信号传输准确性保持最佳。

图 4 为在 λ 条件约束下,3 种协作即 AF、DF 和 HDAF 方式下的 LoRa 服务器节点 S 功率的变化情况。设 $\Omega_{SD} = \Omega_{R,D} = \Omega_{SR_i} = 1$ 。可知,随着 λ 的提高,LoRa 服务器节点 S 功率随之减小。当 λ 为 0.04 时,3 种协作方式的 LoRa 服务器节点 S 功率分别为 22.69 dB,21.74 dB,19.47 dB。HDAF 方式下的系统性能具有明显优势。

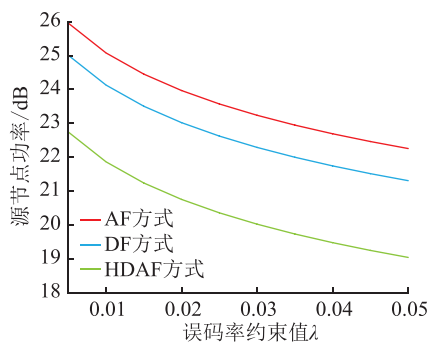


图 4 误码率约束值对源节点功率的影响
Fig.4 Influence of bit error rate constraint value on power of source node

图 5 为不同误码率情况下,3 种协作即 AF、DF 和 HDAF 方式下的总功率变化情况。设 $\Omega_{SD} = \Omega_{R,D} = \Omega_{SR_i} = 1$,误码率约束值 $\lambda = 0.01$ 。可知,误码率数值提高的同时,3 种协作总功率均同步降低。当误码率为 0.3%时,AF、DF、HDAF 3 种协作方式的总功率分别为 30.33 dB,29.28 dB,28.77 dB。HDAF 方案消耗功率始终低于另外 2 种,体现了此方案的优越性。原因是 HDAF 方式能够在信道状态差时,网关中继选择放大转发方式进行协作通信,不用解码再编码,避免用 DF 加深差错传播^[21]。

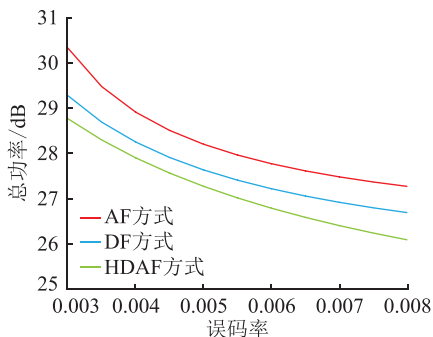


图 5 误码率约束值对总功率的影响
Fig.5 Influence of bit error rate constraint value on total power

4 结语

文中在电力物联网中,针对 LoRaWAN 网络,研究了 LoRa 网关的无线中继优化和功率分配。作为一种新型电力网络系统形态,配电物联网将传统工业运作模式与物联网新兴技术进行了深度融合,通过 HDAF 方式,赋予网络中 LoRa 网关准确而敏捷的感知能力以及终端之间互联、互信、互动功能,将信噪比最大化来择取最佳中继,计算出节点最小功率。由文中数值分析,同等信噪比下,HDAF 方式误码率数值优于 AF 和 DF。可见在信道服务质量得到保障时,该方案能够大限度节省系统能耗,满足配电网日益精准化管控需求,为电力互联网的飞跃发展提供支撑。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“电力泛在物联网多形态终端研制及系统级仿真评估技术研究”(J2019051)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] AL-FUQAHA, MOHAMMADI M. Internet of things; a survey on enabling technologies, protocols, and applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [2] UEMURA K, MURATSU H, MATSUMOTO K. Number of people grasp system of neighboring terminals using Bluetooth low energy [C]//2018 International Conference on Information Networking. 2018.
- [3] ZHENG K, MENG H, CHATZIMISIOS P. An SMDP-based resource allocation in vehicular cloud computing systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7920-7928.
- [4] ZHU G, LIAO C, SUZUKI M. Evaluation of LoRa receiver performance under co-technology interference [C]//2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference. 2018.
- [5] 杨济如,高赐威,苏卫华. 能源互联网及优化运行调度简述 [J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 55-61.
YANG Jiru, GAO Ciwei, SU Weihua. A brief review to the energy internet and its optimal scheduling [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 55-61.
- [6] ZHENG K, ZHAO S, YANG Z. Design and implementation of LPWA based air quality monitoring system [J]. IEEE Access, 2016(4): 3238-3245.
- [7] 吕军, 栾文鹏, 刘日亮, 等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构 [J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3108-3115.
LYU Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution internet of things based on widespread sensing & software defined technology [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3115.
- [8] 孙浩洋, 张冀川, 王鹏, 等. 面向配电物联网的边缘计算技术 [J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4314-4321.

- SUN Haoyang, ZHANG Jichuan, WANG Peng, et al. Edge computation technology based on distribution internet of things [J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4314-4321.
- [9] SALEEM Y, CRESPI N, REHMANI M H, et al. Internet of things-aided smart grid: technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions [J]. IEEE Access, 2019(99): 2962-3003.
- [10] XIAO H, HU Y, YAN K, et al. Power allocation and relay selection for multisource multirelay cooperative vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(11): 3297-3305.
- [11] 吕军, 盛万兴, 刘日亮, 等. 配电物联网设计与应用 [J]. 高压电压技术, 2019, 45(6): 1681-1688.
- LYU Jun, SHENG Wanxing, LIU Riliang, et al. Design and application of power distribution internet of things [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1681-1688.
- [12] TAE W B, WAN C, BANG C J, et al. A cooperative phase steering scheme in multi-relay node environments [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 72-77.
- [13] KE F, FENG S, ZHUANG H. Relay selection and power allocation for cooperative network based on energy pricing [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(5): 396-398.
- [14] DUY T T, KONG H Y. Performance analysis of hybrid decode-amplify-forward incremental relaying cooperative diversity protocol using SNR-based relay selection [J]. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(6): 703-709.
- [15] SYUE S J, WANG C L, AGUILART, et al. Cooperative geographic routing with radio coverage extension for SER-constrained wireless relay networks [J]. IEEE Journal on Communications, 2012, 30(2): 271-279.
- [16] DUONGTQ, ZEPERNICKZHJ. Hybrid decode-amplify-forward cooperative communications with multiple relays [C]//2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2009: 5-8.
- [17] SYUE S J, WANG C L, AGUILAR T, et al. Cooperative geographic routing with radio coverage extension for SER-constrained wireless relay networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(2): 271-279.
- [18] WEI F S, AHMED K, SADEKKJ, et al. SER performance analysis and optimum power allocation for decode-and-forward cooperation protocol in wireless networks [J]. Wireless Personal Communications, 2011, 44(2): 181-217.
- [19] 肖海林, 胡悦, 闫坤, 等. 多源-多中继协作通信的中继选择与功率分配 [J]. 北京邮电大学学报, 2017(2): 73-78.
- XIAO Hailin, HU Yue, YAN Kun, et al. Relay selection and power allocation based on multi-source multi-relay cooperative communication [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017(2): 73-78.
- [20] TOM R J, SANKARANARAYANAN S, RODRIGUES J J P C. Smart energy management and demand reduction by consumers and utilities in an IoT-fog based power distribution system [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7386-7394.
- [21] SUN Y, TONG F, ZHANG Z, et al. Throughput modeling and analysis of random access in narrow-band internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 5(3): 1485-1493.

作者简介:



胡悦

胡悦(1991),女,博士在读,研究方向为低功率广域物联网和协作通信(E-mail: huyue-4900@163.com);

孙云晓(1992),女,硕士,工程师,从事电力系统通信技术及开发工作;

李岩(1987),男,硕士,工程师,从事电力系统通信技术研发及信息系统管理工作。

Wireless relay optimization algorithm based on LoRa gateway

HU Yue¹, SUN Yunxiao², LI Yan², WANG Xiang², WANG Xia², GUO Yajuan²

(1. The College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the development of the power internet of things, the distribution network is facing great challenges. As the end of the power system, it directly faces a large number of actual power users, and its customer experience satisfaction and power supply operation reliability have attracted much attention. In LoRa Wide Area Network (LoRaWAN), a LoRa gateway based optimization algorithm is proposed for wireless relay, which is associated with HDAF to reduce the signal error transmission and power consumption as the nodes speed increases. In this strategy, gateway is treated as relay and the distance of the employed nodes is manipulated by symbol error rate (SER), and the transmission power of all nodes is minimized according to the extreme conditions of Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Numerical results show that the SER can be effectively reduced compared with the forward strategies of amplify-and-forward (AF) and decode-and-forward (DF). Moreover, the power consumption of the communication network employing our proposed strategy will be less than AF and DF in the distribution network.

Keywords: LoRa; hybrid decode-amplify-and-forward (HDAF); power allocation; relay selection; symbol-error-rate

(编辑 方晶)