

可再生能源供电无线通信的最优链路传输策略

Optimal Transmissions Strategy for Wireless Communications Powered by Renewable Energy Sources

杜林松/DU Linsong
黄川/HUANG Chuan

(电子科技大学, 四川 成都 611731)
(University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 611731,
China)

传统的能量受限于无线通信(如: 无线传感器网络), 一般通过能量有限的电池供电。网络的寿命受限于电信容量。当传感器电池中存储的能量用完后, 无线传感器网络将无法正常工作。战场或危险环境中, 替换电池非常不方便; 但利用可再生能源为通信节点供电, 可以提供几乎无限的环保能量供应。

与传统的电池供能相比, 通过能量收集器获得的能量是随时间动态变化的。因此, 可再生能源供电的无线通信设备受到一类能量收集(EH)约束的限制——在任意时间内设备消耗的总能量必须小于在这段时间内收集到的总能量。能量收集约束是可再生能源供电无线通信面临的新挑战。

可再生能源供电无线通信技术在近几年受到了广泛重视^[1-4]。从信息论的角度, 文献[1-2]中作者考虑高斯信道和衰落信道, 得到了可再生能

收稿日期: 2018-07-16
网络出版日期: 2018-09-19

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0006-06

摘要: 利用可再生能源为无线通信发射机供电, 可以实现绿色通信的无线传输。认为通信发射机由可再生能源供电, 并综述了点对点衰落信道的吞吐率最大化问题、中断概率最小化问题。首先, 针对吞吐率最大化问题, 考虑信道相干时间与能量相干时间相同的情况, 提出了基于阈值的最优发射功率分配策略, 给出了阈值的高效计算方法, 并将结果推广到更一般的情形。然后, 针对中断概率最小化问题, 考虑信道相干时间大于或等于能量相干时间情况, 证明了最优分配功率策略具有“存储-发射”的结构。最后, 通过数值结果和仿真验证算法的有效性。

关键词: 能量收集; 吞吐率; 中断概率; 衰落信道; 最优功率分配

Abstract: Wireless transmitter supplied by the renewable energy sources is seen as a way to achieve green communication. The throughput maximization and the outage probability minimization problems in point-to-point fading channels with the transmitter powered by the renewable energy are studied in this paper. First, the throughput maximization problem for the case that the duration of the channel coherence (CC) slot is the same as that of the energy coherence slot is considered, and a “threshold-based” optimal energy allocation is proposed. An efficient numerical algorithm is then proposed to obtain the threshold, and then the results are extended to the case that the duration of the CC slot is less than that of the energy coherence slot. Then, for the outage probability minimization problem, the case that duration of the CC slot is less than or equal to that of the energy coherence slot is considered and its optimal power allocation owns the “save-then-transmit” structure is proved. At last, the numerical results are given to verify the effectiveness of the algorithm.

Key words: energy harvesting; throughput; outage probability; fading channel; optimal power allocation

源供电无线点对点链路的容量; 在容量是无限大的假设下, 作者证明了可再生能源供电无线链路的信道容量可达到传统恒定功率供电下的信道容量。文献[3-4]中, 在时隙有限情况下, 作者确定EH模型(即发射机可以提前知道未来能量达到多少和能量到达时间)和随机EH模型(即发射机

只知道能量达到过程的统计特性)的最大吞吐率。但是, 上述研究并未详细探讨在衰落信道的吞吐率最大化问题。同时, 对于传统的恒定功率供电, 衰落信道的信息论限制已被完全研究透彻^[5-6], 其被称之为中断容量。中断容量被定义为: 在给定的中断概率约束下的最大传输速率, 其中发射功

率在每个时隙上是一个常数。这个最大化问题也可被转化为给定传输速率时的中断概率最小化问题^[5-6]。但是,现阶段并没有深入研究可再生能源供电无线链路的中断概率。

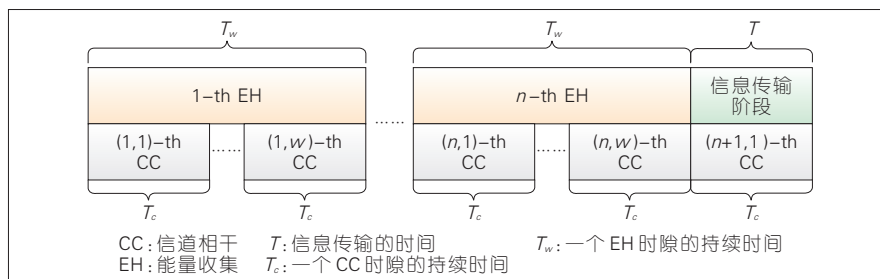
文章中,我们研究在衰落信道下,可再生能源供电无线链路的吞吐率最大化问题和中断概率最小化问题,其中发射机不知道信道状态信息(CSI),但知道信道分布信息。同时,通过实证研究发现^[7-10]:可再生能源产生的能量是随着时间动态到达的,和衰落信道的变化类似,在一个EH相干时隙内,能量到达的速率是恒定的。而在不同的EH相干时隙间,能量到达速率可能会发生变化^[7-8]。在衰落信道中,由于信道变化速度^[9-10]一般都大于能量到达速率的变化速度,因此EH相干时间一般都要大于或等于信道相干(CC)时间(信道系数在CC时隙上保持不变,在不同CC时隙变化)。所以,在一个EH时隙上一般会包含几个CC时隙。

1 吞吐率最大化

首先需要考虑可再生能源供电无线链路的吞吐率最大化问题。

1.1 系统模型

如图1所示,我们考虑一个点对点衰落信道,其中发射机由可再生能源供电。因为电池的半双工性,即电池不能同时充放电,所以发射机在发送信息时不能收集能量。因此,我们采用“存储-然后-传输”的能量控制模式^[11],该模式由2个阶段组成:能量收集阶段和信息传输阶段。



▲ 图1 可再生能源无线链路模型

(1)能量收集阶段:在这个阶段,发射机从可再生能源收集能量。能量收集速率在每个长度为 T_w 的EH时隙内是一个常数,并在不同EH时隙之间变化。在第 n 个EH时隙达到的能量是一个随机变量 $E_n \in [0, A]$, $n \in \{1, 2, 3, \dots\}$, A 是一个有限的常数。能量达到序列 $\{E_n\}$ 是独立同分布的过程,在第 N 个EH时隙的开始, E_1, E_2, \dots, E_N 对于发射机是已知的, $E_n, n \in \{1, 2, 3, \dots\}$ 的概率分布也是已知的。在第 N 个时隙的结束,电池中存储的能量为 $S_N = \sum_{n=1}^N E_n$ 。

衰落信道的信道系数也是准静态的:其在每个长度为 T_c 的CC时隙中保持不变,在不同CC时隙之间变化。CC时隙长度与EH时隙长度之间的关系存在2种情况^[9-10]:EH时隙长度等于CC时隙长度,即 $T_w = T_c$;EH时隙长度大于CC时隙长度,即 $T_w = WT_c, W \in \{2, 3, \dots\}$,也就是说每个EH时隙中包含 W 个CC时隙。

定义在第 n 个EH时隙中的第 w 个CC时隙为第 (n, w) 个CC时隙,其信道增益为 $|h_{n,w}|^2 \in [h_{\min}, h_{\max}]$,信道增益序列 $\{|h_{n,w}|^2\}$ 是一个独立同分布过程(i.i.d.),且与 $\{E_n\}$ 独立。

(2)信息传输阶段:当满足一定条件后,发射机停止能量收集,开始发送信息,信息传输的时间为 T 。同时,信道系数也有可能信息传输阶段变化,因此存在2种情况:信息传输阶段持续时间小于或等于一个CC时隙,即 $T \leq T_c$;信息传输阶段持续

多个CC时隙,即 $T = MT_c, M \in \{2, 3, \dots\}$ 。但事实上,这2种情况的结果都没有太大的区别^[14]。因此,我们只考虑 $T \leq T_c$ 这种情况。

基于上述分析,我们探讨2种情况:情况1($T_w = T_c$);情况2($T_w = WT_c$)。

如果发射机在第 (n, w) 个CC时隙开始发送信息,信道发射机与接收机之间信道输入-输出关系为:

$$y = h_{n,w}x + z, \quad (1)$$

其中 y 是接收到的信号, x 是发射的信号, z 为均值为零,方差为 σ^2 圆对称复高斯(CSCG)噪声。

我们先讨论情况1,然后再将结果拓展到情况2。对于情况1,每个EH时隙上都只有1个CC时隙,所以第 $(n, 1)$ 个CC时隙和第 n 个EH时隙是等价的,因此我们只提EH时隙。为了简化,我们定义 $|h_n|^2 = |h_{n,1}|^2$ 。

1.2 情况1

我们首先提出一个平均吞吐率最大化问题,再给出这个问题的最优能量控制方法。

(1)平均吞吐率最大化问题的建立。在每个传输周期结束后,发射机都将存储在电池里面的所有能量 S_N 用于发送信息。通过香农定理,可得信道容量为 $C = \log(1 + P_r/\sigma^2)$,其中 P_r 是接收到信号的平均功率,即 $P_r = |h_{N+1}|^2 S_N / T$ 。因此,如果发射机在第 N 个EH时隙停止能量收集开始发送信息,那么一个传输周期吞吐率为:

$$\tilde{R}_N = \frac{T \log \left(1 + \frac{|h_{N+1}|^2 S_N}{\sigma^2 T} \right)}{T_w N + T}. \quad (2)$$

可以看出: \tilde{R}_N 是一个随机变量,它的大小取决与电池中存储的能量 S_N 、能量收集停止时间 N 和信道增益 $|h_{N+1}|^2$ 。

我们的目标是:找到一个最优停

止规则来最大化系统的平均吞吐量。从直观上来看,增大能量收集的时间 N ,发射机可以收集到更多的能量 S_N ,从而发送更多的信息;但是过长的能量收集时间 N 又会增大传输周期的时间,从而降低式(2)中的吞吐量。因此,这里存在一个关于能量收集时间 N 和收集能量 S_N 的权衡问题。

考虑传输周期重复 D 次,第 d 个传输周期的停止时间为 N_d , $d \in \{1, 2, \dots, D\}$, D 个传输周期的平均吞吐率为:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{d=1}^D T \log \left(1 + \frac{|h_{N+1,d}|^2 \sum_{n=1}^{N_d} E_{n,d}}{\sigma^2 T} \right)}{\sum_{d=1}^D T_w N_d + T} \quad (3)$$

其中 $E_{n,d}$ 为第 d 个传输周期中的第 n 个 EH 时隙收集到的能量, $|h_{N+1,d}|^2$ 为第 d 个传输周期中的第 $(N+1)$ 个 EH 时隙的信道增益。因为 $E_{n,d}$ 和 $|h_{N+1,d}|^2$ 存在平稳性和各态历经性,因此 N_d 也存在平稳性且各态历经性,通过 Birkhoff 遍历性原理^[12],可得:当 $D \rightarrow \infty$,几乎确定 (a.s.)

$$\bar{R} \rightarrow \frac{\mathbb{E} \left\{ \log \left(1 + \frac{|h_{N+1}|^2 S_N}{\sigma^2 T} \right) \right\}}{\mathbb{E}(T_w N + T)} \triangleq R_N \quad (4)$$

因此,在无限时域上,对于上述的可再生能源无线通信系统,存在着一个平均吞吐量最大化问题,即问题(P1):

$$(P1) \quad k^* = \sup_{N \in \mathbb{C}} R_N \quad (5)$$

其中 k^* 是最大平均吞吐量, \mathbb{C} 是停止规则的可行域^[13],即:

$$\mathbb{C} = \{N: N \geq 1, \mathbb{E}(N T_w + T) < \infty\} \quad (6)$$

问题(P1)是一个最优停止^[13]问题,通过解决问题(P1),一个最优停止规则^[13]可以被找到:

$$N^* = \arg \sup_{N \in \mathbb{C}} R_N \quad (7)$$

(2)最优停止规则。首先,通过

证明如下2个假设成立,

$$A1: \mathbb{E} \left(\sup_{n \geq 1} R_n \right) < \infty;$$

$$A2: \limsup_{n \geq 1} R_n \leq R_\infty = -\infty;$$

我们可知P1最优停止规则是存在的^[13]。

P1的最优停止规则拥有“阈值”结构,其阈值大小取决于收集到能量的大小,其具体形式为^[14]:

$$N^* = \min \{n \geq 1: |h_{n+1}|^2 \geq G(S_n)\} \quad (8)$$

其中 $G(S_n)$ 是一个关于信道增益 $|h_{n+1}|^2$ 的阈值,它的大小取决于当前电池中存储的能量 S_n 。

通过式(8)我们可以发现:

- 最优停止规则的阈值 $G(S_n)$ 是一个关于 S_n 的函数。很明显 S_n 的大小随着 EH 时隙变化的,因此 $G(S_n)$ 也随着时间变化;

- 函数 $G(\cdot)$ 与 EH 时隙 n 无关,因此它是不变的。所以我们可以在进行传输之前就求出方程 $G(S)$, $S \in [0, S_c]$, 其中 S_c 是电池容量。

$G(S)$ 则可以通过式(9)后向递归得出^[14]:

$$G(S) = \frac{\left(\frac{Z_s}{2T} - 1 \right) \sigma^2 T}{S} \quad (9)$$

其中 Z_s 为:

$$Z_s = \mathbb{E} \left\{ \max \left[\begin{array}{l} T \log \left(1 + \frac{\min(S+E, S_c)}{\sigma^2 T} \right) \\ T \log \left(1 + G(\min(S+E, S_c)) \frac{\min(S+E, S_c)}{\sigma^2 T} \right) \end{array} \right] \right\} - k^* T_w \quad (10)$$

首先,如果电池容量 $S \in [0, S_c]$ 是连续的,那么必须将其离散化为 $S \in [0, \delta, \dots, i\delta, \dots, S_c]$, 其中 δ 是一个常数。然后,为了开始进行后向递归,我们需要计算出递归的初始值 $G(S)$, 它是如下方程的根:

$$\mathbb{E} \left\{ \max \left[T \log \left(\frac{\sigma^2 T + |h_1|^2 S_c}{\sigma^2 T + G(S_c)} \right), 0 \right] \right\} - k^* T_w = 0 \quad (11)$$

最后,我们通过式(9)和式(10)从 $G(S_c)$ 到 $G(0)$ 开始递归。

在电池容量无限的情况下,最优停止规则和阈值的递归计算方法与电池容量有限情况下的方法基本相同,唯一区别是:必须从 $S_c = \infty$ 开始递归。而 $G(\infty)$ 是一个有限值^[14], 是如下方程的根^[14]:

$$\mathbb{E} \left\{ \max \left[T \log \left(\frac{|h_1|^2}{G(\infty)} \right), 0 \right] \right\} - k^* T_w = 0 \quad (12)$$

1.3 情况2

通过图1可以看出:对于情况2(即EH时隙的长度大于CC时隙的长度),发射机在任何一个EH时隙的末端停止能量收集,它一定也在一个CC时隙的末端停止能量收集。因此,我们只需要考虑在哪个CC时隙停止能量收集。针对情况2,我们也需要找到一个最优停止规则 (N^*, W^*) 使得平均吞吐量最大化。

情况2的最优停止规则形式为^[14]:

$$N^* = \min \{n \geq 1: |h_{n,w}|^2 \geq G(S_{n,w}, E_n), n \geq 1, W \geq w \geq 1\} \\ W^* = \min \{w \geq 1: |h_{N^*, w}|^2 \geq G(S_{N^*, w}, E_{N^*}), W \geq w \geq 1\} \quad (13)$$

其中 $S_{n,w}$ 为在第 (n, w) 个 CC 时隙时电池里存储的能量。可以看出:情况2和情况1的最优停止规则的形式相似,不同点在于:情况2的阈值大小不仅与当前CC时隙收集到的总能量 $S_{n,w}$ 有关,还与最后一个EH时隙中收集到的能量大小有关。

2 中断概率最小化

本节我们考虑可再生能源无线链路的中断概率最小化问题。对于中断概率最小化问题,CC时间小于EH相干时间和CC时间等于EH时隙的结果是完全一样的,因此我们将其放在一起考虑。首先,我们给出系统模型。

2.1 系统模型和问题建立

和上一节的系统模型类似,整个传输过程经历 N 个 EH 时隙,每个 EH 时隙包含 W 个 CC 时隙。在每个 EH 时隙中,能量收集速率不变^[15],定

义为 Q_n , $i=1, \dots, N$, 且发射机可以提前知道所有 EH 时隙的能量收集速率。在第 (n, w) 个 CC 时隙的信道输入-输出关系为:

$$y_{n,w} = h_{n,w} \sqrt{P_{n,w}} x_{n,w} + z_{n,w}, \quad (14)$$

$n=1, \dots, N$, $w=1, \dots, W$, 其中 $y_{n,w}$ 是接收到的信号, $x_{n,w}$ 是零均值, 方差为 1 的发射信号, $P_{n,w}$ 是发射功率。这里的 $h_{n,w}$ 对于发射机是未知的, 但接收机是完全已知的。

每个 CC 时隙对应的瞬时互信息量为^[15]:

$$I_{n,w}(h_{n,w}, P_{n,w}) = \log \left(1 + \frac{|h_{n,w}|^2 P_{n,w}}{\sigma^2} \right). \quad (15)$$

所有 CC 时隙的传输速率都为一定值 R , 因此在第 (n, w) 个 CC 时隙的中断概率为:

$$\Phi(P_{n,w}) = \Pr \left\{ I_{n,w}(h_{n,w}, P_{n,w}) < R \right\} = \Pr \left\{ |h_{n,w}|^2 < \frac{2^R - 1}{\sigma^2 P_{n,w}} \right\}. \quad (16)$$

需要注意的是: $\Phi(P_{n,w})$ 是一个由发射功率 $P_{n,w}$ 、信道增益 $|h_{n,w}|^2$ 的概率分布, 以及传输速率 R 组成的中断概率函数。此外, $\Phi(\cdot)$ 在 $P_{n,w} \geq 0$ 时严格单调递减。

每个 CC 时隙可用的发射功率受到如下 EH 约束条件的限制^[15]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w P_{i,j} \leq W \sum_{i=1}^{n-1} Q_i + w Q_n, \quad (17)$$

$$n=1, \dots, N, m=1, \dots, M$$

可以看出, 这里存在一个有限 CC 时隙上的平均中断概率最小化的问题(P2):

$$(P2) \quad \min_{\{P_{i,j}\}} \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \Phi(P_{i,j}), \quad (18)$$

$$s.t. (16), P_{i,j} \geq 0, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M. \quad (19)$$

很明显, 约束条件(19)是一个线性约束。因此问题(P2)的凹凸性取

决于函数 $\Phi(\cdot)$ 。

2.2 最优功率分配

在本小节中, 我们首先给出中断概率函数 $\Phi(\cdot)$ 的一些重要特性, 然后利用这些特性来获得问题(P1)的最优解。

(1) 中断概率函数的特性。我们用威布尔衰落^[16]来举例, 这里省略 $|h_{n,w}|^2$ 和 $P_{n,w}$ 中的 (n, w) 。在威布尔衰落下, 复信道系数 h 可以被表示为:

$$h = (X + jY)^{2/\beta}, \quad (20)$$

其中 X 和 Y 是零均值且方差为 1 的独立同分布高斯随机变量, β 是一个反应信道衰落严重性和复杂性的参数, 且 $\beta > 0$ 。当 $\beta=2$ 时, 威布尔衰落就退化为著名的瑞利衰落。 $|h|$ 的概率密度函数为 $f(r) = \beta r^{\beta-1} \exp(-r^\beta)$, 且 $r = |h| \geq 0$, 因此对应的中断概率函数为:

$$\Phi(P) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{2^R - 1}{P} \right)^{\beta/2} \right]. \quad (21)$$

对于威布尔衰落的中断概率, 可知定义在式(21)中的中断概率函数在 $P \in [0, P_b]$ 范围内是凹的, 而在 $P \in [P_b, +\infty)$ 上是凸的, 其中:

$$P_b = \left(\frac{\beta/2}{\beta/2 + 1} \right)^{\beta/2} (2^R - 1). \quad (22)$$

威布尔衰落、莱斯衰落、Nakagami 衰落等, 都有上述性质, 也存在这样一个 P_b 。

(2) 最优解的结构。问题(P2)的最优解有如下 2 个特点^[15]。

• 在 P2 的最优解中, 最多只存在一个严格为正且大小低于 P_b 的最优分配功率 $P_{n,w}^*$ 。所以, 除了这唯一的特殊情况, 在一般情况下对于任何 CC 时隙, 如果可用的发射功率低于 P_b , 发射机都不能发送信息, 即

$P_{n,w}^* = 0$, 必须等到可用发射功率高于 P_b 才可以发送信息。

• 在 P2 中, 任意 2 个连续 CC 时隙的最优分配功率 $P_{n,w}^*$ 和 $P_{n,w+1}^*$ 同时大于 P_b 的充要条件^[15]: 如果在第 (n, w) 个 CC 时隙, 定义在式(17)中的 EH 约束条件无法取等, 即

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w P_{i,j} < W \sum_{i=1}^{n-1} Q_i + w Q_n, \text{ 则 } P_{n,w}^* = P_{n,w+1}^* ;$$

如果 $P_{n,w}^* < P_{n,w+1}^*$, 则在第 (i, j) 个 CC 时隙的 EH 约束条件取等, 即

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w P_{i,j} = W \sum_{i=1}^{n-1} Q_i + w Q_n.$$

从上述 2 个点可以总结出: 问题 P2 的最优解也存在“存储-然后-发射”的结构。首先, 发射机在一定数量的 CC 时隙中保持沉默, 然后, 发射机(可能)在一个 CC 时隙内以小于 P_b 的功率传输信息, 最后, 发射机保持一个大于 P_b 的功率传输信息, 然后在能量刚好耗尽的 EP 时隙之后(即约束条件(17)取等)提高功率级。

3 数值结果

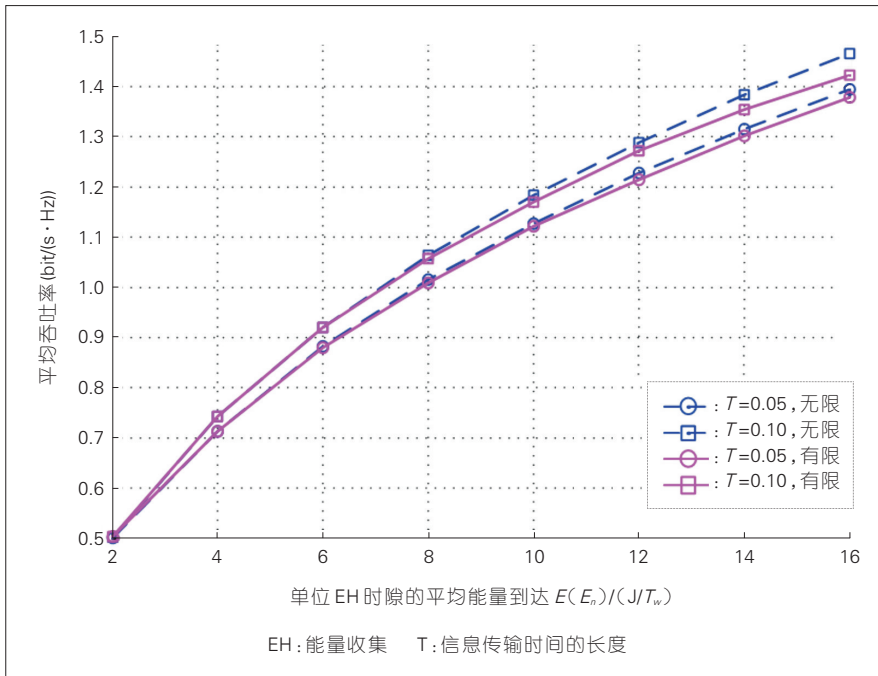
本节分别给出在不同可再生电源供电无线通信场景下的最大吞吐率和最小中断概率的数值结果, 其中噪声功率被设为 $\sigma^2 = 1$ 。

3.1 吞吐率

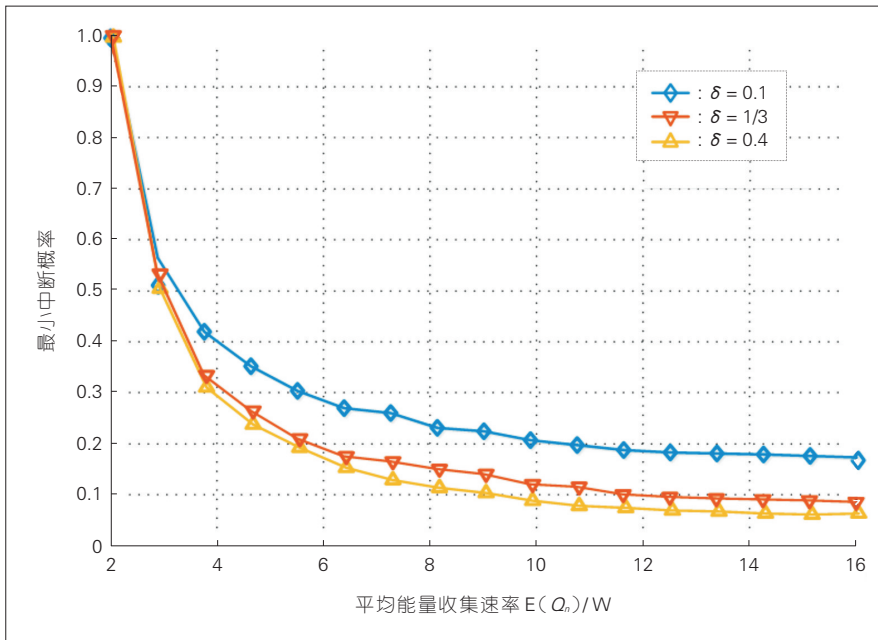
图 2 展示了在情况 1 下(即 $W=1$ 时), 不同 $E(E_n)$ 的最大平均吞吐率, 其中 $\{E_n\}$ 和 $\{h_n\}$ 都独立同分布, E_n 在 0 和 A 上 2 点分布, 每个 EH 时隙的长度为 $T_w = 0.1$ s。在电池容量有限时, $S_c = 80$ J。从图 2 描绘的曲线可以看出: 在电池容量无限情况下的平均吞吐率大于电池容量有限情况下的最大平均吞吐率。同时, 这 2 种情况下吞吐率之间的差距随着 $E(E_n)$ 的增加而增大, 而在 $T=0.1$ s 时的吞吐率大于 $T=0.05$ s 时的吞吐率。

3.2 中断概率

图 3 展示了在不同平均能量收集



▲图2 最大平均吞吐量与单位能量收集实习时隙的平均能量到达之间的关系



▲图3 最小中断概率与平均能量收集速率之间的关系

速率 $E(Q_n)$ 时的最小中断概率。考虑一阶马尔科夫能量达到过程,其中能量收集速率 Q_n 存在3种状态: $0, P, 2P$ 。定义能量收集速率从1个状态转移到另外2个状态的概率都为 δ ,且 $0 \leq \delta \leq 1/2$ 。因此,能量收集速率保持不变的概率为 $1-2\delta$ 。对于其他

参数,可以设 $W=1, N=20, R=0.5 \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)}$ 。从图3可看出:在平均能量收集速率相同的情况下,状态转移概率 δ 越大,中断概率越小。

4 结束语

针对点对点衰落信道,我们研究

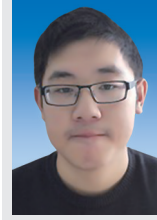
了发射机由可再生能源供电的吞吐量最大化问题和中断概率最小化的问题,其中未来的CSI对于发射机是未知的。首先,针对吞吐量最大化问题,我们证明在CC时间与EH相干时间相等的情况,最优功率控制策略拥有阈值结构,并提出一个递归方法来求得其阈值,并将上述情况下的结果推广到更加一般的情况。然后,研究了CC时隙的长度大于或等于EH时隙的长度这种情况下的中断概率最小化问题,证明了其最优功率分配拥有“存储-发射”的结构。最后,检验了数值结果以及验证算法的有效性。

参考文献

- [1] OZEL O, ULUKUS S. Information-Theoretic Analysis of an Energy Harvesting Communication system[C]// Processing of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). USA: IEEE, 2010: 330-335. DOI: 10.1109/PIMRCW.2010.5670389
- [2] RAJESH R, SHARMA V, VISWANATH P. Capacity of Fading Gaussian Channel with An Energy Harvesting Sensor Node[C]// Processing of Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). USA: IEEE, 2011: 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6133901
- [3] HO C K, ZHANG R. Optimal Energy Allocation for Wireless Communications with Energy Harvesting Constraints [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60 (9): 4808-4818. DOI: 10.1109/TSP.2012.2199984
- [4] TATUNCUOGLU K, YENER A. Optimum Transmission Policies for Battery Limited Energy Harvesting Nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180-1189. DOI: 10.1109/TWC.2012.012412.110805
- [5] BIGLIERI E, PROAKIS J, SHAMAI S. Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44 (6): 2619-2692. DOI: 10.1109/18.720551
- [6] GOLDSMITH A J, VARAIYA P P. Capacity of Fading Channels with Channel Side Information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1997, 43(6): 1986-1992. DOI: 10.1109/18.641562
- [7] HO C K, KHOA P D, MING P C. Markovian Models for Harvested Energy in Wireless Communications[C]// Processing of

- International Conference on Communication Systems (ICCS). USA: IEEE, 2010: 311–315. DOI: 10.1109/ICCS.2010.5686445
- [8] VENTURA J, CHOWDHURY K. Markov Modeling of Energy Harvesting Body Sensor Networks[C]// Processing of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). USA: IEEE, 2011: 2168–2172. DOI: 10.1109/PIMRC.2011.6139899
- [9] SADEGHI P, KENNEDY R A, RAPAJIC P B, et al. Finite-State Markov Modeling of Fading Channels—A Survey of Principles and Applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(5):57–80. DOI: 10.1109/MSP.2008.926683
- [10] KHUZANI M B, SAFFAR H E, ALIAN E H M, et al. On Optimal online Power Policies for Energy Harvesting with Finite-State Markov Channels[C]// Processing of International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT). USA: IEEE, 2013: 1586–1590. DOI: 10.1109/ISIT.2013.6620494
- [11] LUO S, ZHANG R, LIM T J. Optimal Save-Then-Transmit Protocol for Energy Harvesting Wireless Transmitters[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1196–1207. DOI: 10.1109/TWC.2013.012413.120488
- [12] CORNFELD I P, FOMIN S V, SINAI Y G. Ergodic Theory[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4615-6975-5
- [13] FERGUSON T S. Optimal Stopping and Applications [EB/OL]. (2017-02-01) <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>
- [14] DU L, LI Q, HUANG C. Optimal Save-Then-Transmit for Random Energy Harvesting Communications: An Optimal Stopping Approach[J]. IEEE Access, 2017, 5: 26487–26500. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2772317
- [15] HUANG C, ZHANG R, CUI S. Optimal Power Allocation for Outage Probability Minimization in Fading Channels with Energy Harvesting Constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 1074–1087. DOI: 10.1109/TW.2013.121813.130953
- [16] SAGIAS N C, KARAGIANNIDIS G K. Gaussian Class Multivariate Weibull Distributions: Theory and Applications in Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(10): 3608–3619. DOI: 10.1109/TIT.2005.855598

作者简介



杜林松, 电子科技大学在读博士研究生; 主要研究方向为可再生能源通信、全双工中继通信等; 发表SCI期刊论文1篇, 国际会议论文2篇。



黄川, 电子科技大学教授、博士生导师, 《IEEE Access》、《IEEE Wireless Communication Letters》编辑, IEEE 亚太通信协会下属会员发展分委会秘书, IEEE 通信协会学生竞赛委员会委员; 主要研究方向为无线通信、通信信号处理、人工智能和优化理论在无线通信中的应用; 2016年第十二批国家“千人计划”青年人才项目入选者, 2014年四川省“千人计划”特聘专家, 2015年“成都人才计划”特聘专家; 发表专著1部、论文60余篇。

←上接第5页

能源为坦桑尼亚偏远地区供电所起的作用提供有用的数据。

致谢

本研究得到华北电力大学许晨老师和重庆大学 Edwin J. Kitindi 博士的帮助, 谨致谢意!

参考文献

- [1] WU J, ZHOU S, NIU Z S. Traffic-Aware Base Station Sleeping Control and Power Matching for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 4196–4209. DOI:10.1109/twc.2013.071613.122092
- [2] SU L, YANG C, CHIH-LIN I. Energy and Spectral Efficient Frequency Reuse of Ultra Dense Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8):5384–5398. DOI: 10.1109/TWC.2016.2557790
- [3] 孙俨. 风能、太阳能互补供电型基站的应用[J]. 通信电源技术, 2011, 28(4): 33–37. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2011.04.010
- [4] 马怀新. 新能源与减碳 [J]. 四川水力发电, 2010, 29(s2):286–301
- [5] 丁强. 太阳能并网发电在通信基站中的应用研究[C]//中国通信学会信息通信网络技术委员会2011年年会论文集(下册). 2011
- [6] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势 [J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 7–13. DOI:10.3969/j.issn.1005-2992.2016.02.002
- [7] 崔志刚, 吕宇欣, 郝颖, 等. 新能源供电系统在通信基站中应用的关键技术研究[J]. 通信电源技术, 2011, 28(4): 5–8, 94. DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2011.04.001
- [8] ADEFARATI T, BANSAL R C, JOHN JUSTO J. Techno-Economic Analysis of a PV-Wind-Battery-Diesel Standalone Power System in A Remote Area [J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 740–744. DOI: 10.1049/joe.2017.0429
- [9] BHOWMIK D, SINHA A K. Cost-Based Allocation Model for Hybrid Power System Considering Solar, Wind and Thermal Generations Separately [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(18): 4576–4587. DOI:10.1049/iet-gtd.2017.0305
- [10] GONG J, THOMPSON J S, ZHOU S, et al. Base Station Sleeping and Resource Allocation in Renewable Energy Powered Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11): 3801–3813. DOI:10.1109/tcomm.2014.2359883

作者简介



王亚华, 华北电力大学在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。



周振宇, 华北电力大学副教授、博士生导师; 主要研究方向为无线异构网络、绿色通信与智能电网通信等; 主持国家级与省部级项目4项; 发表ESI高被引论文2篇, SCI论文40余篇, 申请发明专利20余项。



贾云健, 重庆大学通信工程学院研究员、博士生导师; 主要研究方向为无线通信、移动网络、通信计算融合等; 承担国家级省部级科研项目10余项; 发表论文80余篇, 获权发明专利36项。