

# 多跳 AF 中继中的动态混合携能通信<sup>\*</sup>

林浩男 毛明禾

(河海大学 南京 211100)

**摘要:** 考虑从信源到信宿经过  $m$  跳的多跳 AF 中继传输,给出了混合时间分配和功率切割的无线携能通信协议的帧结构构建过程。在每个中继的总传输功率和吞吐量一定的约束条件下,评估了功率传输效率和信息传输性能之间的权衡关系。导出了双参数混合的非闭合形式表达式,计算出在给定节点吞吐量下的最大可实现跳数。数值仿真结果表明,为了扩展网络覆盖范围和保证能源效率,可以通过不同的中继跳数动态调整两个参数,以实现最佳的无线携能通信性能。

**关键词:** 多跳 AF 中继;动态混合时间分配和功率切割;无线携能通信;应急通信

**中图分类号:** TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

## Dynamic hybrid SWIPT for multi-hop AF relaying systems

Lin Haonan Mao Minghe

(Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In this paper, the multi-hop amplify-and-forward (AF) relaying transmission from the source to its destination after the  $m$ -th hop is considered, and the frame structure construction process of the hybrid time-switching (TS) and power-splitting (PS) simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) protocol is given. Under the constraint of the total transmission power and throughput of each relay, the trade-off relationship between power transmission efficiency and information transmission performance is evaluated. A non-closed formal expression of double hybrid parameters is derived, and the maximum number of achieved hops under a given node throughput is calculated. The numerical simulation results show that, in order to expand network coverage and ensure energy efficiency, the two parameters can be dynamically adjusted by different relay hops to achieve the optimal SWIPT performance.

**Keywords:** multi-hop AF relaying; dynamic hybrid TS and PS; simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT); emergency communications

## 0 引言

应急通信系统在遇到自然灾害、事故隐患、公共卫生事件、社会安全事件等突发事件后,可以保证指挥调度管理系统的通畅运行,从而能提高灾后重建和基础设施恢复的效率。然而,由于这些事件的紧急性,构建应急通信系统的最基本要求是要迅速采取行动。为了实现这一要求,一方面可以构建一个独立于现有通信网络的新型应急通信网络,但可能会长期消耗大量的人力和物力资源,从现实和救援的角度来看,这是不可行的;另一方面,在大多数紧急情况下,在严重受灾区域或偏远山区铺设通信光纤电缆和电源线是不可行的。总而言之,构建一个可与现有通信网络互补的无线应急通信很有必要。

对于常见情况,应急通信操作通常发生在距离固定常规基站最远的地方,因此单跳中继几乎没有任何意义。为了进一步扩大传输范围,可以采用多跳无线中继。放大转发(amplify-and-forward, AF)是一种常用的多跳无线中继协议<sup>[1]</sup>,其中中继节点接收来自信源或前一跳中继节点的信号,然后经放大后转发出去。文献[2]研究了多跳中继系统中的无线信道参数性能,并通过在中继节点处进行放大转发。基于这种中继方法的简单性,本文考虑了多跳 AF 中继。

然而,传统的 AF 中继协议存在一个严重的问题,即所有的中继节点必须由有线电力设施或太阳能电池供电,这在某些场景中显然是不可取的,例如,中继节点是同一网络中依赖电池工作的对等用户,中继任务将会更快地耗尽电池能量。因此,中继节点本身会受到更多的能量限制。文

献[3-5]采用无线能量收集来解决这个问题。在无线中继节点中,无线能量收集中继的实现分为两部分:一个是能量收集器,它不仅从信源节点,还从其他相邻节点收集来自传输信号的能量;另一个是进行放大和转发操作的中继器。因此,中继节点可以再次忽略电池问题的限制。文献[3]提出了几种连续时间能量收集中继协议,并分析了它们的性能。它们的两个重要协议是时间分配(time-switching, TS)和功率切割(power-splitting, PS)。其中 TS 接收器根据 TS 系数<sup>[6]</sup>在无线能量收集和无线信息传输之间切换时,接收到的射频信号首先切换到能量收集器,然后切换到信号接收器;PS 接收器根据 PS 系数<sup>[7]</sup>将接收信号分成两部分,一部分用于能量收集器,另一部分用于信号接收器。

应急通信中,为了补充通信受损区域或通信覆盖盲区,可以利用无线信息传输;而补充电力受损区域或电力覆盖盲区,则可采用无线能量传输。无线携能通信(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)<sup>[7-10]</sup>系统的无线节点从其接收到的射频信号中收集能量为数据传输提供能量,这种系统恰好满足上述两个条件。使用射频能量收集进行远程充电的同时,使用无线中继转发接收到的信号<sup>[3,11-13]</sup>,对于在紧急救援区域没有多少额外充电基础设施的移动手持终端设备或移动基站,尤其是应急救援行动中所谓的最后一公里通信问题<sup>[14]</sup>来说,SWIPT 是一种扩大信号传输范围或扩大网络覆盖范围的有效方法。

对于 SWIPT 多跳系统,仅从延长传输范围或增加基站网络覆盖的角度来看,文献[6]的分析结果表明 TS 优于 PS。然而,对于单中继系统而言,从提高信噪比和误码率的通信性能的角度来看,文献[15]表明了 PS 优于 TS。因此,在选择 TS 协议或 PS 协议的权衡上存在优化问题。一些启发式的方法已经说明混合 TS 和 PS 协议能够提高 SWIPT 整体性能。在文献[16]中,作者提出了一种用于全双工大规模 MIMO 系统的波束域混合 TS 和 PS SWIPT 协议,显示了与传统协议相比在频谱效率方面的优越性。文献[17]为 OFDM 系统提出了一种人工噪声辅助混合 TS 和 PS 协议,可以保证数据传输和能量传输。然而,文献[16]和[17]中的混合协议并未涉及多跳中继场景,这限制了混合协议特别是在应急通信区域方面的应用范围。上述工作主要集中在双跳中继的混合 TS 和 PS 协议,关于多跳中继的混合 TS 和 PS 协议方面的研究很少。

基于文献[6]的方案,本文提出了一种基于多跳 AF 中继的动态混合 TS 和 PS 的 SWIPT 方法。优化的中继性能可以通过动态调整 TS 和 PS 的因子来实现。

数值仿真结果表明,在单个多跳 AF 中继下行链路的 SWIPT 系统中,在给定初始信源能量和中继距离的情况下,通过调整混合 TS 和 PS 协议中能量收集的不同时间和功率参数可以实现最佳 SWIPT 性能,并且所获得的最大跳数取决于几个重要的系统参数,例如初始信源能量和中继距离。另一方面,能量转换效率显示并不那么重要,并且

在实际情况下,由于硬件设备的限制,很难得到提高。虽然发现 PS 优于 TS<sup>[15]</sup>,但仅使用 PS 协议,跳数不能显著改善,实际上它只能支持单跳中继,这限制了通信范围的扩展。而动态混合 TS 和 PS 协议不仅能够保证通信性能,而且能够达到与 TS 协议相同的最大跳数。

## 1 系统模型与推导

与文献[6]类似,本文考虑了一个从信源节点到目的地节点经过几跳的下行链路中继系统。假设每个节点都是半双工的并且具有单个天线,这很容易将结果扩展到多个天线或多个链路。为了增加网络覆盖,假设信源和目的地之间没有直接链路,同时假定多于一跳的节点之间没有直接链路。该信号携带来自信源节点的功率和信息,并且由多跳中继节点中继,每跳一个节点,直到它到达目的地节点为止。在每一跳中,中继节点首先收集来自信源或前一跳信号的能量,然后使用所收集的能量将信号中继到下一跳或目的地,如图 1 所示。其中  $m = 1, 2, \dots$  表示跳数,  $d_m$  是第  $m$  跳中的节点距离,  $g_m$  是第  $m$  个中继  $R_m$  处的放大因子,  $r_0[k] = s[k]$  是假定发送的二进制相移键控信号,其中  $s[k] = -1$  和  $s[k] = 1$  具有相等的先验概率;根据文献[3],  $n_{ma}[k]$  是由第  $m$  个中继的射频前端引入的加性高斯白噪声,  $n_{mc}[k]$  是在第  $m$  个中继的射频到基带转换操作中引入的加性高斯白噪声。此外,假设  $n_{ma}[k]$  和  $n_{mc}[k]$  为均值为 0、方差分别为  $\sigma_{ma}^2$  和  $\sigma_{mc}^2$  的高斯随机变量。

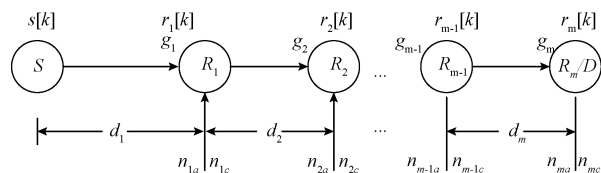


图 1 从信源(S)到目的地( $R_m/D$ )经过  $m$  跳的多跳中继传输

进一步假设在每一跳中传送信号需要  $T$  秒。混合 TS 和 PS 的 SWIPT 协议的帧结构构建过程如下。首先,中继花费  $T$  中的一部分时间收集来自信源或前一跳信号的能量,第  $m$  跳即第  $m$  个中继的该部分时间占比用 TS 因子  $\alpha_m$  表示,其中  $m = 1, 2, \dots$  且  $0 \leq \alpha_m < 1$ 。其次,中继将整个中继时间  $T$  的  $1 - \alpha_m$  部分的接收信号功率的一部分分割用于收集能量,第  $m$  个中继的该部分功率占比用 PS 因子  $\beta_m$  表示,其中  $m = 1, 2, \dots$  且  $0 \leq \beta_m < 1$ 。应当注意,当  $\beta_m = 0$  时,混合协议退化为纯 TS 协议;反之,当  $\alpha_m = 0$  时,混合协议退化为纯 PS 协议。

因此,对于多跳 AF 中继,来自前一跳的接收信号使用其分配和切割的能量直接放大并转发到下一跳。因此,第  $m$  个中继的接收信号可以由式(1)给出。

$$r_m[k] = \sqrt{(1 - \beta_m) P_{m-1} g_{m-1}} \frac{u_m}{\sqrt{d_m}} r_{m-1}[k] + \sqrt{(1 - \beta_m)} n_{ma}[k] + n_{mc}[k] \quad (1)$$

式中:  $P_{m-1}$  是来自第  $m-1$  个中继节点的传输功率;  $P_0$  表示信源传输功率;  $u_m$  是第  $m$  跳的衰落系数, 并假定  $u_m$  是不变的;  $v$  是路径损耗指数。此外, 为了简化表达式, 假设  $u_m$  已知并且距离  $d_m$  设置为 1。当需要明确距离时, 可以在以下结果中轻松地用  $\frac{u_m}{\sqrt{d_m^v}}$  替换  $u_m$ 。然后式(1)可表示为:

$$r_m[k] = \prod_{i=1}^{m-1} g_i \prod_{j=0}^{m-1} \sqrt{(1-\beta_{j+1})P_j} \cdot \prod_{i=1}^m u_i s[k] + \sum_{i=1}^m \left\{ \prod_{j=i}^{m-1} g_j \cdot \prod_{j=i}^{m-1} \sqrt{(1-\beta_{j+1})P_j} \prod_{j=i+1}^m u_j \cdot [(1-\beta_i)n_{ia}[k] + n_{ic}[k]] \right\} \quad (2)$$

放大系数  $g_i$  对应两种类型的 AF 中继增益<sup>[18]</sup>:

1) 固定增益:

$$g_i = \frac{1}{\sqrt{P_{i-1}\Delta_i + \sigma_{ic}^2 + \sigma_{ia}^2}} \quad (3)$$

其中  $\Delta_i = E\{|u_i|^2\}$  表示平均衰落功率<sup>[19]</sup>。

2) 可变增益:

$$g_i = \frac{1}{\sqrt{P_{i-1}|u_i|^2 + \sigma_{ic}^2 + \sigma_{ia}^2}} \quad (4)$$

另外, 应该注意的是, 在式(2)中,  $\Pi$  的乘积符号在下限大于上限时在数学上没有明确定义。如果发生这种情况, 为了避免这种符号问题, 乘积结果设置为 1。例如, 当  $m=1$  时,  $\prod_{i=1}^0 g_i = 1$ 。

基于式(1), 第  $m$  个中继的收集能量为:

$$E_{hm} = \eta \prod_{i=1}^m u_i^2 \prod_{i=1}^{m-1} g_i^2 \prod_{i=0}^{m-1} P_i \cdot \prod_{i=1}^{m-1} (1-\beta_i)\alpha_m T + \eta \prod_{i=1}^m u_i^2 \cdot \prod_{i=1}^{m-1} g_i^2 \prod_{i=0}^{m-1} P_i \prod_{i=1}^{m-1} (1-\beta_i) \cdot (1-\alpha_m)\beta_m T \quad (5)$$

式中:  $\eta$  是能量转换效率。由于每跳的总传输时间是  $T$ , 所以第  $m$  个节点的传输功率是:

$$P_m = \frac{E_{hm}}{T} = \eta \prod_{i=1}^m u_i^2 \prod_{i=1}^{m-1} g_i^2 \prod_{i=0}^{m-1} P_i \cdot \prod_{i=1}^{m-1} (1-\beta_i) [\alpha_m + (1-\alpha_m)\beta_m] \quad (6)$$

应注意, 式(6)是关于  $T$  的归一化形式, 因为  $T$  决定传输功率的总传输时间。

然后, 第  $m$  个中继的吞吐量是:

$$C_0 = (1-\alpha_m) \log_2(1+\gamma_m) \quad (7)$$

其中  $\gamma_m$  由式(8)给出:

$$\gamma_m = \frac{\prod_{i=1}^m u_i^2 \prod_{i=1}^{m-1} g_i^2 \prod_{i=0}^{m-1} (1-\beta_{i+1})P_i (1-\alpha_m)T}{\sum_{i=1}^m \left\{ \prod_{j=i+1}^m u_j^2 \prod_{j=i}^{m-1} g_j^2 \prod_{j=i}^{m-1} (1-\beta_{j+1})P_j [(1-\beta_i)\sigma_{ia}^2 + \sigma_{ic}^2] \right\}} \quad (8)$$

当  $m$  增加时, 每一跳的收集能量以加速的速率减少。因此, 存在一个临界值  $m$ , 基于某些标准, 收集的能量不足

以进行传输。因此, 发现其临界值非常意义:

$$(1-\alpha_m) \log_2(1+\gamma_m) < C_0 \quad (9)$$

在此之前,  $m$  跳具有  $C_0$  的吞吐量, 使得可以找到最佳系数  $\alpha_m$  和  $\beta_m$  在初始功率条件  $P_0$  下最大化中继传输范围。虽然没有  $\alpha_m$  和  $\beta_m$  的闭式表达式来使式(9)达到临界值, 但可以使用数学软件解决。

## 2 数值仿真结果与讨论

在本节中, 将给出数值仿真结果, 以检查不同收集因子以及不同系统参数的最大中继范围。在仿真实验中, 不失一般性, 参数设定为  $\sigma_{ma}^2 = \sigma_{mc}^2 = 0.01$ ,  $u_m^2 = 0.1$ ,  $\Delta_m = 0.1$ , 其中  $m = 1, 2, \dots, T = 1, v = 3, C_0 = 3$ 。让  $\gamma_0 = \frac{u_1^2 P_0 T}{\sigma_{1c}^2 + \sigma_{1a}^2}$  成为第 1 个中继的初始信噪比。该初始信噪比与信源节点的初始能量  $P_0 T$  直接相关。

图 2~4 所示分别显示了当实现不同的混合因子对时, 对于不同的  $\gamma_0$ ,  $\eta$  和  $d$  值, 在给定节点吞吐量下的最大跳数。正如所料, 较大的初始信噪比  $\gamma_0$ , 较高的转换效率  $\eta$  和较小的  $d$  值导致较大的跳数。但是, 在实际情况中, 初始信噪比和转换效率通常是有限的, 并且网络覆盖范围与中继距离和跳数的乘积有关, 当  $d$  增加时, 由于实现的最大跳数减少, 所以不能仅通过增加  $d$  来改善。比较 3 个参数, 可以看出对网络覆盖范围扩展影响最大的是混合协议因子  $\alpha_m$  和  $\beta_m$ 。

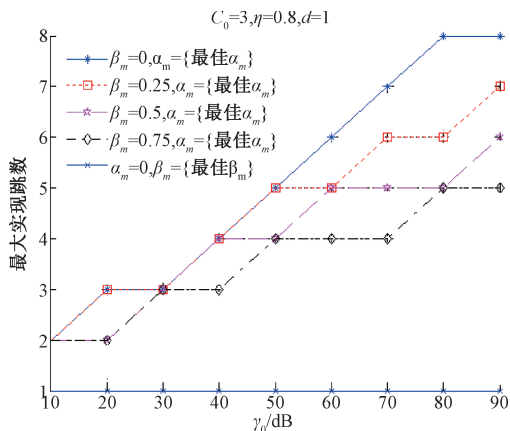
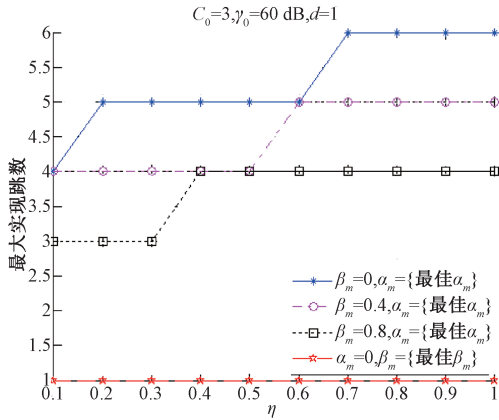
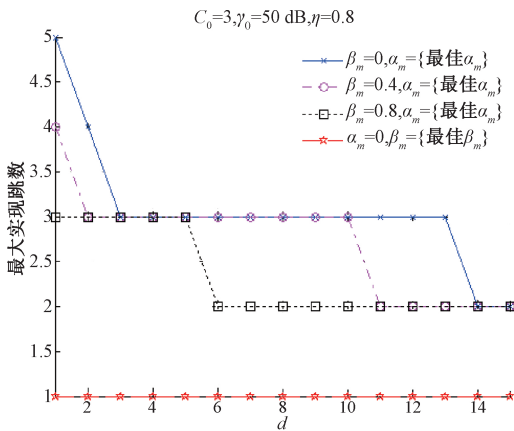


图 2 不同  $\gamma_0$  值下的最大实现跳数

另一方面, 图 2~4 表明较小的  $\beta_m$  在  $\alpha_m$  被优化之后将会获得较大的跳数, 但是小的  $\beta_m$  将减小用于加强中继信号的功率, 尤其是最后几跳为长距离的情况下。这是因为较小的  $\beta_m$  在混合协议中占据了 TS 成分的较大部分, 因此跳数将尽可能地扩大, 但是在最后几跳时, 无线信息传输信号将变得非常弱, 就需要较大的  $\beta_m$  来加强信号的功率。这是一个权衡问题, 可以根据具体问题进行动态优化。这说明了动态混合 TS 和 PS 的 SWIPT 协议不仅能够保证通信性能, 而且能够达到与 TS 协议相同的最大跳数。需要注意的是, 当  $\alpha_m$  为 0 时, 混合协议降为 PS 协议, 该协议在所有


 图 3 不同  $\eta$  值下的最大实现跳数

 图 4 不同  $d$  值下的最大实现跳数

3 种情况中仅在吞吐量约束下实现单跳。解释如下。对于 AF 中继中的 PS 协议,收集和中继的功率基本上不同(当且仅当  $\beta_m = 0.5$  时,两个部分具有相同的功率)。当时间  $T$  固定时,为了传递大部分能量以供后面的中继使用,即使第 1 个中继分配一小部分功率用于中继并因此收集少量能量,而实际上,由于分配的功率只有一小部分,第 1 个中继使用一个大的传输功率仅用来将一个弱信号传输到下一跳。在这种情况下,浪费了大部分的信源能量,因此无线信息传输不能延伸多于一个中继跳。这与分配一个小的传输功率去传输一个强信号一样是不可取的。在上述两种情况下,下一个中继的收集功率非常小,导致浪费了大量的能量。

图 5~6 所示表明随着  $\beta_m$  的增加,每一跳的收集能量和传输误码率的中继性能急剧下降。如前所述,虽然大的  $\beta_m$  浪费了无线信息传输的一些能量,但通过动态分配  $\beta_m$  的适当值可以更好地节省相关中继节点的电路成本能量,从而可以节省整个系统所消耗的能量。这进一步说明了动态混合 TS 和 PS 的 SWIPT 协议能够保证通信性能。

总之,扩展网络覆盖范围和保证能源效率的最佳方法

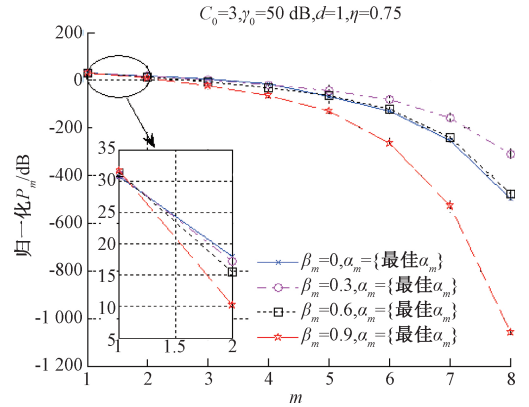


图 5 每一跳的归一化收集能量

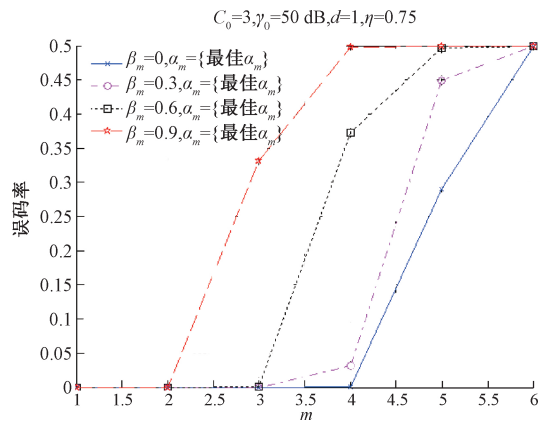


图 6 每一跳的传输误码率

是使用动态混合 TS 和 PS 的 SWIPT 协议。应当避免使用  $\alpha_m = 0$  或  $\beta_m = 0$  时的降级情况。应该注意,推导通过假设距离为 1 来简化分析。尽管如此,具有不同相关距离的加权跳数(无线信息传输范围是每跳实现的中继距离的总和)实际上决定了中继网络的覆盖范围。并且所有结果都基于固定的信道增益,而不是基于各种信道实现的平均值。

### 3 结 论

本文研究了多跳 AF 中继系统中的动态混合 TS 和 PS 的 SWIPT 协议。导出了双参数混合的非闭合形式表达式。使用数学软件,获得了在给定吞吐量限制下的最大中继跳数以及每一跳的收集能量和误码率。本文提出的数值仿真结果表明,在每个中继的总传输功率和吞吐量一定的约束下,功率传输效率和信息传输性能之间存在权衡。可以通过动态调整两个混合因子  $\alpha_m$  和  $\beta_m$  来实现权衡,以实现最佳的 SWIPT 中继性能。

### 参考文献

- [1] FARHADI G, BEAULIEU N C. Capacity of amplify-and-forward multi-hop relaying systems under adaptive

- transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(3):758-763.
- [2] KHAN F A, CHEN Y, ALOUINI M S. Novel receivers for AF relaying with distributed STBC using cascaded and disintegrated channel estimation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(4):1370-1379.
- [3] NASIR A A, ZHOU X, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7):3622-3636.
- [4] DING Z, PERLAZA S M, ESNAOLA I, et al. Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2):846-860.
- [5] CHEN Y. Energy-harvesting AF relaying in the presence of interference and Nakagami-m fading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2):1008-1017.
- [6] MAO M, CAO N, CHEN Y, et al. Multi-hop relaying using energy harvesting [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(5):565-568.
- [7] ZHOU F, LI Z, CHENG J, et al. Robust AN-aided beamforming and power splitting design for secure MISO cognitive radio with SWIPT [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4):2450-2464.
- [8] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5):1989-2001.
- [9] LIU H, KIM K J, KWAK K S, et al. QoS-constrained relay control for full-duplex relaying with SWIPT[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(5):2936-2949.
- [10] LU A A, Gao X, Zheng Y R, et al. Linear precoder design for SWIPT in MIMO broadcasting systems with discrete input signals: manifold optimization approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(7):2877-2888.
- [11] LANEMAN J N, WORNELL G W. Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks[C]. IEEE Wireless Communications and NETWORKING Conference, 2000(1):7-12.
- [12] CHEN Y, ZHAO N, ALOUINI M S. Wireless energy harvesting using signals from multiple fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(11):5027-5039.
- [13] NASIR A A, ZHOU X, DURRANI S, et al. Wireless-powered relays in cooperative communications: time-switching relaying protocols and throughput analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(5):1607-1622.
- [14] BAUMGÄRTNER L, KOHLBRECHER S, EULER J, et al. Emergency communication in challenged environments via unmanned ground and aerial vehicles[C]. IEEE Global Humanitarian Technology Conference, 2017:1-9.
- [15] LI L, MAO M, CAO N, et al. LMMSE channel estimation for wireless energy harvesting AF relaying[J]. Physical Communication, 2018, 27:133-142.
- [16] XU K, SHEN Z, WANG Y, et al. Hybrid time-switching and power splitting SWIPT for full-duplex massive MIMO systems: a beam-domain approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8):7257-7274.
- [17] SHAFIE A E, TOURKI K, AL-DHAHIR N. An artificial-noise-aided hybrid TS/PS scheme for OFDM-based SWIPT systems [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3):632-635.
- [18] RENZO M D, GRAZIOSI F. A comprehensive framework for performance analysis of dual-hop cooperative wireless systems with fixed-gain relays over generalized fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10):5060-5074.
- [19] NABAR R U, BOLCSKEI H, KNEUBUHLER F W. Fading relay channels: performance limits and space-time signal design[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6):1099-1109.

## 作者简介

**林浩男**, 硕士研究生, 主要研究方向为多跳中继、信道估计等。

E-mail: 171828195@qq.com

**毛明禾**, 博士、讲师, 主要研究方向为认知无线电、多跳中继、无线异构网络、仿生机器人等。

E-mail: mmh\_1988@126.com