



基于跨层策略的 60 GHz 脉冲多用户通信系统性能分析

李学华, 沈琛, 姚媛媛

(北京信息科技大学信息与通信工程学院, 北京 100101)

摘要: 由于具备免许可、强方向性、高系统容量和吉比特的高传输速率等优势, 60 GHz 频段被列为 5G 新空口 (new radio, NR) 的候选频段之一。在 5G 超密集组网场景中, 网络节点之间距离的降低引起的节点开关转换的随机性会导致严重的多址干扰、资源失配问题。对此, 基于跨层协同设计的思想, 提出了一种基于公平性的资源调度策略, 在基于 TH-PAM (time hopping pulse amplitude modulation) 的 60 GHz 脉冲无线通信系统中对该策略的多址接入性能进行仿真分析。仿真结果表明, 相比采用纯物理层优化算法的系统, 采用该策略的多址接入系统表现出更强的公平性、更低的系统误码率, 但需要额外增加发射功率来满足同等通信系统覆盖范围的要求, 即在系统的能量与公平性之间存在一定的折中, 可用于指导实际通信系统的构架与布设。

关键词: 5G; 多址接入; 跨层资源分配; 公平性

中图分类号: TN914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018224

Performance analysis of 60 GHz pulse multiuser communication system based on cross-layer strategy

LI Xuehua, SHEN Chen, YAO Yuanyuan

School of Information & Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China

Abstract: Due to the advantages of license-free, strong directionality, high system capacity, and high transmission rate of Gbit/s, 60 GHz band is listed as one of the candidate bands for new radios (new radio). In 5G ultra-dense networking scenario, the randomness of node switching caused by the decrease of the distance between network nodes may cause severe multiple access interference and resource mismatch problems. In this regard, based on the concept of cross-layer collaborative design, a resource scheduling strategy based on fairness was proposed. The multiple access performance of the strategy was simulated in a 60 GHz pulsed wireless communication system based on TH-PAM (time hopping pulse amplitude modulation). Simulation results show that compared with the system with pure physical layer optimization algorithm, the multiple access system which adopts this strategy shows stronger fairness and lower system error rate, but it needs increase the transmission power to meet the requirements of the coverage of the equivalent communication system. That is, there is a certain trade-off between the energy and fairness of the system, which can be used to guide the structure and deployment of the actual communication system.

Key words: 5G, multiple access, cross layer resource allocation, fairness

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61601038)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61601038)

1 引言

随着手持移动智能终端的大范围普及和数据流量的千倍增长,4G移动通信网络已经不能满足人们对速率、容量、频谱等方面的需求。为了解决这些问题,面向未来的5G技术成为通信技术领域研究的热点之一^[1-2]。由于拥有丰富的免许可频谱资源、强方向性、高系统容量和吉比特的高传输速率等优势^[3],60 GHz频段被列为5G高频新空口的候选频段之一。目前60 GHz是毫米波频段中第一个被应用于实际系统的频段,包括Qualcomm(高通)在内的业界主流芯片供货商已经提供了IEEE 802.11ad的产品^[4]。各种研究报告和白皮书的研究成果表明,在非授权频谱部署5G系统是运营商未来的发展路径之一^[5]。加之,60 GHz频段的射频器件成熟度较高^[6],易于开发并应用于实际系统。综上,60 GHz是5G系统在毫米波频段中最重要的候选频率。

参考文献[7]提出了基于60 GHz的脉冲通信方式,并对其容量和误码率性能进行了分析。研究表明,该通信方式具有良好的抗多径衰落特性。参考文献[8]提出60 GHz无线通信技术已经成为短距离无线通信技术的首选,并将建立的60 GHz无线通信系统模型应用于芯片间互联装置,能够有效抑制多径干扰。在5G高频、新空口、热点、高容量场景中,多用户干扰是主要问题。无线通信系统中,多址接入技术使得多个用户共享同一信道成为可能,可以有效地解决多用户干扰问题。参考文献[9]建立了基于TH-PAM(time hopping pulse amplitude modulation)的60 GHz脉冲无线通信系统模型,在IEEE 802.15.3c信道模型下研究了系统误码性能、用户数和通信距离之间的关系,分析了TH-PAM多址调制下多用户干扰特性,并与TH-PPM方案进行了比较。仿真结果显示,TH-PAM多址调制方式更加适合于60 GHz脉冲无线短距离通信。IEEE 802.15.3c工

作小组2009年推荐了几种60 GHz无线通信系统信道模型。其中CM4信道为非视距情况下办公环境中的60 GHz信道模型^[10],符合本文的应用场景,因此本文采用该信道模型作为基础进行理论分析和仿真。

在5G超密集组网应用场景中,由于网络节点之间距离的减小,大量节点的开启和关闭具有随机性,会造成严重的多址干扰、资源分配不均等问题。虽然多址接入机制主要在链路层完成,但与其与物理层、网络层、传输层、应用层密切相关。在传统的开放系统互连(open system interconnect, OSI)分层协议结构和网络设计中,每一层协议只实现特定的功能。OSI分层结构是针对具有信息高可靠性传输特点的有线网络设计的,但是无线网络中具有信息传输空间复杂、用户移动快速等特点,“最后一公里”环境是极其不稳定的,传统的分层协议结构很难维持网络性能的稳定性,因此就无法保证最大化利用系统的资源,无法满足用户的QoS要求^[11-12]。要解决上述问题,也就是在网络资源有限的情况下,要保证超密集网络的服务质量,跨层设计是最有效的方式之一。

跨层设计的核心思想是将传统的分层协议栈看作统一的整体进行优化设计,同时为了充分利用OSI各层之间的约束信息,需额外添加一个跨层调度模块用以收集各层资源信息状态,从而使无线资源管理策略可以充分利用有限的网络资源,以满足网络承载业务的QoS要求,进而提高整个网络的性能^[18-21]。目前,针对60 GHz脉冲无线通信系统的研究尚未涉及跨层资源分配的问题,将超密集组网中的资源配置与多址技术相结合,对物理层的调制技术、数据链路层的接入机制进行纵向综合考虑,是解决5G超密集应用的有效途径之一。

2 系统模型与公平性调度策略

60 GHz脉冲无线通信系统的多用户资源分



配方案模型如图 1 所示。基于公平性的资源分配算法模块和数据调度模块，接收系统的信道状态信息和用户业务量信息，然后将数据调度模块中调度器的判决结果控制发射机，给用户分配相应的发射功率。

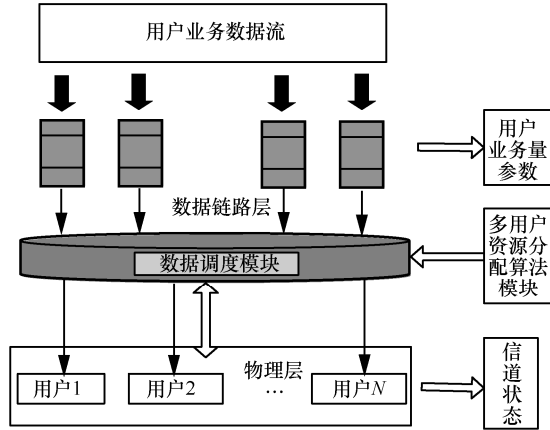


图 1 60 GHz 脉冲无线通信系统的多用户资源分配方案模型

以拥有 U 个用户的 60 GHz 脉冲无线通信系统为研究对象，设 $i=1, \dots, U$ 代表用户的标号。定义在时隙 s 内：分配给用户的数据速率矢量是 $\bar{r}_i = (0, R_i^1, R_i^2, \dots, R_i^n)^T$ ；数据调度器会为每一个用户确定其数据速率 $\bar{X}_i(s) = [X_i(s), X_2(s), \dots, X_U(s)]$ ，其中 $X_i(s) \in \bar{r}_i$ ；链路层加权因子 $\bar{V}(s) = [\bar{w}_1(s), \bar{w}_2(s), \dots, \bar{w}_U(s)]$ 表示链路层对用户速率的概率加权； $\bar{J} = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_U)$ 表示每个用户的到达数据量。如果单纯考虑最大化系统吞吐量，则可以用式 (1) 表示：

$$\max \phi(s) = \max \sum_{i=1}^U \varpi_i(s) X_i(s) \quad (1)$$

即系统吞吐量可以表示为数据速率的加权和，但这种策略可能会造成资源分配不公平的问题。为了保证持续公平性，下面将对原有系统进行跨层设计，动态调整先前已分配好的参数，使得各个时隙内用户获得的数据速率的均值与其业务量成正比。即：

$$\frac{E[X_1(s)]}{\phi_1} = \frac{E[X_2(s)]}{\phi_2} = \dots = \frac{E[X_U(s)]}{\phi_U} \quad (2)$$

其中， $E[X_i(s)]$ 表示期望， $\frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^U \phi_j}$ 表示用户 i 业务量占总业务量的比例， $\frac{X_i(s, \bar{w}(s))}{\sum_{j=1}^U X_j(s, \bar{w}(s))}$ 表示在参数

$\bar{v}(s)$ 的约束下，第 s 个时隙分配给用户 i 的数据速率占总数据速率的比例。在理想情况下， $\frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^U \phi_j}$ 和 $\frac{X_i(s, \bar{v}(s))}{\sum_{j=1}^U X_j(s, \bar{v}(s))}$ 应该相等，但在实际情况中两者

肯定有偏差，因此可定义为：

$$f_1(\bar{v}(s)) = \frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^U \phi_j} - \frac{X_i(s, \bar{v}(s))}{\sum_{j=1}^U X_j(s, \bar{v}(s))} \quad (3)$$

其中， $f_1(\bar{v}(s))$ 表示 $\frac{X_i(s, \bar{v}(s))}{\sum_{j=1}^U X_j(s, \bar{v}(s))}$ 较 $\frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^U \phi_j}$ 的偏移

量。可以通过随机近似算法^[22]获得约束参数 $\bar{v}(s)$ ，即可以表示为：

$$\varpi_i(s+1) = \varpi_i(s) + \frac{1}{s} f_1(\bar{v}(s)) \quad (4)$$

其中， $f_1(\bar{v}(s)) > 0$ 表示在前一个时隙中，系统给用户 i 分配的数据速率不够，所以经过式 (4) 迭代运算后，第 $s+1$ 个时隙的加权因子 $\bar{v}(s+1)$ 会增大，接着在速率分配时，用户 i 获得的数据速率也会随之增大。这样就能达到对公平性调整补偿的目的，反之亦然。

定义 1 $\bar{A}(s) = (A_1(s), A_2(s), \dots, A_U(s))$ ， $A_i(s)$ 用来表征时隙 s 内用户 i 的缓存内剩余量的数据矢量。

由此可以得到调度速率矢量 $\bar{X}(s) = (X_1(s), X_2(s), \dots, X_U(s))$ ， $X_i(s) = r_i^x$ ，而 $r_i^x \in \bar{r}_i$ ，必须满足式 (5)：

$$r_i^x \leq \frac{\varpi_i(s) A_i(s)}{\sum_{j=1}^U \varpi_j(s) A_j(s)} \sum_{j=1}^U A_j(s) \gamma < r_i^{x+1} \quad (5)$$

其中, γ 为物理层约束因子。依据式 (5) 可知, 用户所获得的数据速率与加权剩余量所占总加权剩余量的比值呈正比关系, 比值越大则数据速率越大。同时, 调度器将从数据速率矢量中选择最近似的值分配给用户。通过以上策略保证各用户公平性后, 接下来要依据用户已分配到的数据速率作为约束参数来实现发射功率最小、通信距离最远, 达到物理层最优化的目的。

参考文献[23]根据 Friis 方程和 60 GHz 系统噪声模型推导出了系统性能与最大通信距离 d 之间的关系, 为:

$$\text{SNR} \leq 116 - 10 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n \quad (6)$$

其中, n 为功率衰减指数, 一般取值 2.2, 是与中心频率相对应的波长。

建立基于 TH-PAM 的 60 GHz 脉冲无线通信系统模型, 在 IEEE 802.15.3c 信道模型下推出了系统误码性能与用户数、通信距离之间的关系表达式:

$$\text{BER}_{\text{TH-PAM}} = 0.5 \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{2N_s}{\frac{(N_u - 1)}{\beta N_h} + \frac{1}{10^{\frac{116 - 10 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n}}}}} \right) \quad (7)$$

其中, β 为脉冲占空比的倒数 (取决于 T_p 和 T_c 的大小, 一般为定值), N_s 为用户数, N_u 为每比特脉冲数, N_h 为跳时码最大值上界。

给定一个用户的 BER 模型和通信距离 d_k , 根据香农定理^[24], 可以推出以下容量表达式:

$$c_i(f) = \lg[1 + \xi \times \text{SNR}_i(d_k)] (\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}) \quad (8)$$

其中, $\xi = \frac{1.5}{-\ln(5\text{BER})}$ 表示 SNR 间隔。所谓 SNR

间隔就是在理论和实际情况下, 系统为达到某一特定误码率性能所需要的 SNR 之间的差异。

用户 i 在通信距离为 d_k 的数据速率可以表示为:

$$r_i \leq \Delta f \times \sum_{k=1}^U \theta_{i,k} \lg \left[1 + \beta \times \left(116 - 10 \lg \left(\frac{4\pi d_k}{\lambda} \right)^n \right) \right] \quad (9)$$

其中, Δf 表示系统带宽。那么, 在上文基于公平性策略求出的各用户数据速率的条件约束下, 调度器需要给 U 个用户分配相应通信距离以使发射功率最小。可以用式 (10) 表示这个问题:

$$\min \bar{P}_i = \min \left[\sum_{k=1}^U P_k \right] \quad (10)$$

即最小化 U 个用户的总发射功率。假设每一个用户都只能处在互不相同的位置, 可以用式 (11) 来表示这种约束关系:

$$\sum_{i=1}^U \theta_{i,k} = 1, k \in [1, S] \quad (11)$$

结合式 (6), 用户数据速率受限于式 (12):

$$r_i \leq \Delta f \times \sum_{k=1}^U \theta_{i,k} \lg \left[1 + \beta \times \left(116 - 10 \lg \left(\frac{4\pi d_k}{\lambda} \right)^n \right) \right] \quad (12)$$

通过以上分析, 目标函数式 (10) 也就变成了一个受式 (11) 和式 (12) 约束的极值求解优化问题, 即目标函数为:

$$\min \bar{P}_i = \min \left[\sum_{i=1}^U P_i \right] \quad (13)$$

约束条件为:

$$\text{C1: } \sum_{i=1}^U \theta_{i,k} = 1, k \in [1, S] \quad (14)$$

$$\text{C2: } r_i \leq \Delta f \times \sum_{k=1}^U \theta_{i,k} \lg \left[1 + \beta \times \left(116 - 10 \lg \left(\frac{4\pi d_k}{\lambda} \right)^n \right) \right] \quad (15)$$

可以采用 Lagrange (拉格朗日) 乘法求解这种优化问题。

拉格朗日函数为:



$$L = \sum_{i=1}^U P_i - \beta_i \mathcal{N} \times \sum_{i=1}^U \theta_{i,k} \ln \left[1 + \xi \times \left(116 - 10 \lg \left(\frac{4\pi d_k}{\lambda} \right)^n \right) \right] - \alpha_i \left(1 - \sum_{i=1}^U \theta_{i,k} \right) \quad (16)$$

其中, α_k 与 β_k 分别是针对两个约束条件 C1、C2 的拉格朗日因子, 分别对其求偏导, 得:

$$\sum_{i=1}^U \left| \frac{\partial P_i}{\alpha_i} \right| = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^U \left| \frac{\partial P_i}{\beta_i} \right| = 0 \quad (18)$$

即解得调度器分配给 U 个用户的最优通信距离, 从而得到相对应的最优功率分配。

3 算法步骤

综上所述, 该算法分为 5 步, 流程如图 2 所示。

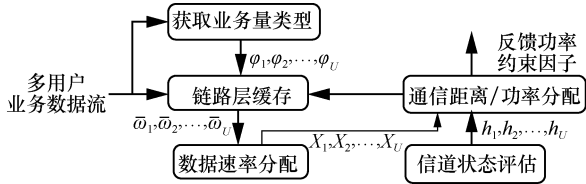


图2 算法过程示意图

步骤 1 在发射端获取各个用户的业务量参数矢量 $\bar{j} = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)$ 。

步骤 2 数据链路层缓存接收到的业务数据流, 调度器获取该时隙各用户的链路层加权因子 $\bar{v}(s) = [\bar{w}_1(s), \bar{w}_2(s), \dots, \bar{w}_U(s)]$ 和缓存内剩余数据矢量 $\bar{A}(s) = (A_1(s), A_2(s), \dots, A_U(s))$ 。

步骤 3 根据式 (5), 调度器将给用户分配与以上两个矢量相对应的数据速率。

步骤 4 在式 (11)、式 (12) 的约束下求式 (10), 以分配通信距离和相应的功率。

步骤 5 计算 $\bar{d}$ 与 $\bar{P}_i$, 并与门限进行比较, 判断是否有效。如果无效, 反馈距离约束因子 $\bar{P}_i / \bar{P}_{th}$ 。

4 仿真与分析

本节对上述算法在 60 GHz 脉冲无线通信系统中的性能进行仿真分析。假设系统包含 $U=10$ 个用户, 每个用户的数据到达过程都符合 Poisson (泊松) 分布。在 BER 为 10^{-5} 情况下可以计算出因子 $\beta = 0.1229$; 每个用户至发射机的距离在 40 m 内随机分布。

在室内密集环境中, 假设每一个用户都在某些固定位置, 图 3 给出了其中 3 个用户在数据链路层加权因子相同、通信距离不相同的情况下的吞吐量变化过程。仿真结果表明, 初始阶段即时间在 20 s 以内, 3 个用户所获得的吞吐量差异很大: 用户 2 获得的吞吐量最大, 用户 3 获得的吞吐量最小。由于用户 2 的通信距离最近, 用户 3 的通信距离最远, 也就是说在数据链路层加权因子相同的情况下信道条件更好的用户获得的吞吐量更大。但是随着时间逐渐增大, 它们的吞吐量曲线彼此逐渐接近, 3 个用户获得的吞吐量大致相等且都占总吞吐量的 1/3。这是因为 3 个用户的业务量参数和数据链路层加权因子都相同, 由式 (5) 可知, 它们所获得的吞吐量也应该相同, 这样就保证了系统分配资源的公平性。

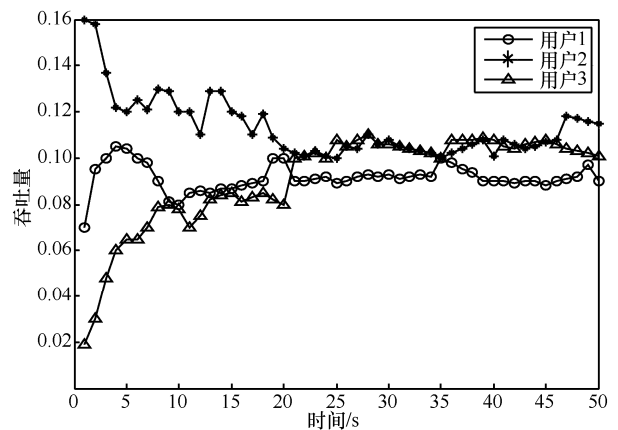


图3 数据链路层加权因子相同时的吞吐量对比

图 4 给出了 3 个用户数据链路层加权因子比例为 1:3:6 的吞吐量对比仿真结果。从理论上分析, 虽然 3 个用户的业务量参数相同, 但是数据

链路层加权因子不同,根据式(5)可推理出:数据链路层加权因子越大的用户获得的数据速率也越高,且两者成正比关系,所以3个用户所获得的数据速率比例也应该为1:3:6。从图4给出的仿真结果中不难发现:随着时间增大,3个用户的吞吐量曲线也逐渐趋于平缓,且与它们的数据链路层加权因子值成正比,权值越大的用户获得的吞吐量就越大,最终3个用户所获得的吞吐量比例与数据链路层加权因子比例值相同,也为1:3:6。因此,图3和图4充分说明了本节所研究的基于公平性跨层资源调度算法在数据链路层的性能,可以通过控制数据链路层加权因子比例的方式来提高系统分配资源的公平性。

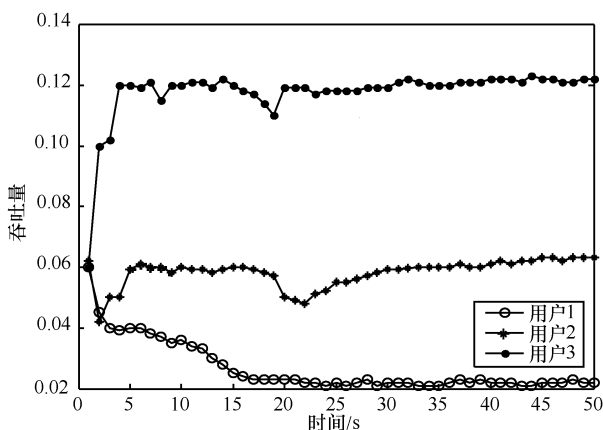


图4 数据链路层加权因子比例1:3:6时的吞吐量对比

然而,跨层资源分配策略还需要考虑物理层资源的优化问题。即要求在发射功率的约束下,为了实现吞吐量最大化,系统应该选择信道状态较好的用户进行数据传输。图5是没有采用跨层资源分配算法,只采用纯物理层最优化算法的仿真结果三维图。从图5的仿真结果可以看出:用户2的数据传输速率最大,由式(13)可知,在跳时码数相同的情况下,用户2分配得到的每比特脉冲数最小,也就是说用户2在获得资源更多的情况下,处理的业务数据量却更少,尽管10个用户都希望得到相同数据传输速率,用户2却占用了更多的资源。这就可能会出现分配给用户2

的资源过多而造成资源浪费,而其他需要处理大量业务数据的用户得到的资源又太少,这样分配资源就缺乏公平性。因此,需要采用基于公平性的跨层资源分配策略对其进行优化。

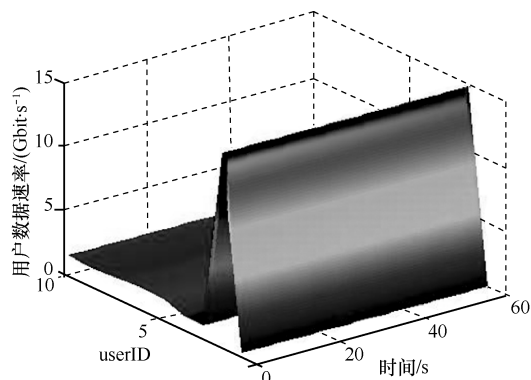


图5 纯物理层优化算法用户速率对比

图6显示的是采用了基于公平性的跨层设计方案的仿真结果三维图。图6表明,随着时间的增大,10个用户所获得的数据速率逐渐趋于稳定,且都近似相等,相比于只采用物理层优化方案的系统,采用本文所研究的基于公平性的跨层资源分配策略的系统更加公平。但是在吞吐量要求相同的情况下,由算法计算出的平均通信距离 $\bar{d}$ 的值可知,本文所设计的跨层资源分配策略要求通信距离范围在20 m内,而只采用物理层最优化算法方案的系统的通信距离范围在35 m以内,也就是说覆盖范围减少了15 m左右,如果要求两者的覆盖范围相同,则采用本文所研究的基于公平性的跨层资源分配策略的系统需要增加发射功率。

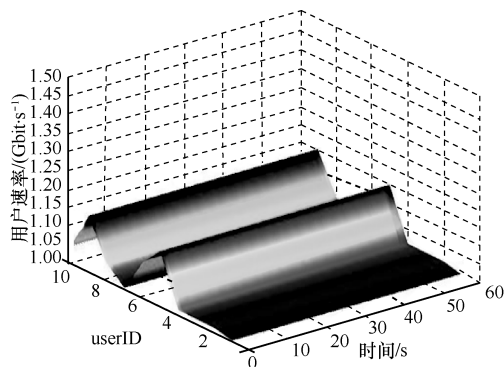


图6 跨层资源分配用户数据速率对比



在误码率性能方面,图7是采用基于公平性跨层资源分配策略的系统与采用纯物理层优化算法的系统的误码率性能仿真结果对比,可以看出:采用跨层资源分配策略的系统误码率性能略优于采用纯物理层优化算法的系统。综上所述,将基于公平性的跨层资源分配策略用于60 GHz脉冲无线通信系统中,在相同吞吐量和发射功率的要求下,系统误码率性能没有损失,且系统分配资源的公平性得到提升,但是覆盖范围会有所减小。即以一定的功率性能换取公平性能,并能保证系统误码率性能,从而提升了系统的整体性能。

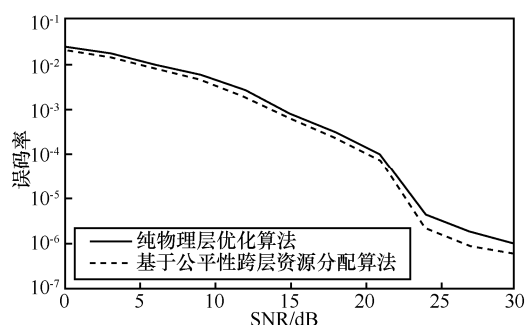


图7 误码率性能对比

5 结束语

针对目前60 GHz脉冲无线通信系统中尚未涉及的跨层资源分配问题,本文通过引入基于公平性的资源调度模块,实现基于跨层资源分配的多址接入方案来提高系统的整体性能。将超密集组网中的资源配置与多址技术相结合,设计跨层信息协调器,对物理层的调制技术、数据链路层的接入机制进行纵向综合考虑,利用该应用场景的特定条件对跨层资源优化算法进行简化设计,并与多址技术的关键参数相关联,探究了一种能保证资源分配公平性的多址接入方案。通过仿真与分析,验证了该策略能在保证系统误码率性能的情况下提高资源分配的公平性。本文的研究将为5G超密集场景的应用提供技术参考,推动5G技术路线的细化,促进5G标准化进程及后续产业的发展。

参考文献:

- [1] 尤肖虎. 对5G移动通信发展的思考[J]. 中兴通讯技术, 2015(1): 2-3.
YOU X H. Thoughts on the development of 5G mobile communication[J]. ZTE Technology Journal, 2015(1): 2-3.
- [2] 王志勤, 罗振东, 魏克军. 5G业务需求分析及技术标准进程[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(2): 1-4.
WANG Z Q, LUO Z D, WEI K J. 5G business requirements analysis and technology standards process[J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(2): 1-4.
- [3] HANSEN C J. WiGiG: multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(6): 6-7.
- [4] WANG J, LIANG X, SHI W, et al. Fingerprinting localization based on 60GHz impulse radio[C]//IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers and Signal Processing, Sept 16-19, 2015, Gwangju, Korea. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [5] PARK S, SHIN Y, SONG P. LTE-advanced mobility performance enhancement in dense small cell environment[C]//2013 IEEE International Conference on ICT Convergence (ICTC), October 14-16, 2013, Jeju Island, South Korea. Piscataway: IEEE Press, 2013: 262-267.
- [6] 岳光荣, 陈雷, 徐廷生, 等. 60 GHz 高速率短距离通信系统综述[J]. 无线电通信技术, 2015(5): 1-6.
YUE G R, CHEN L, XU T S, et al. Overview of 60 GHz high rate short distance communication system[J]. Radio Communications Technology, 2015(5): 1-6.
- [7] 李娜. 60 GHz 脉冲无线通信系统的性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
LI N. Performance study of 60 GHz pulse wireless communication system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [8] ZHANG X, SHI W, ZHU W. The design and performance analysis of inter-chip wireless communication system in instrument based on 60 GHz[C]//IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, July 16-18, 2015, Qingdao, China. Piscataway: IEEE Press, 2015: 813-818.
- [9] 张永斌, 李学华, 姚勃旭. 60 GHz 脉冲无线通信系统的TH-PAM多址接入方案[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 17-23.
ZHANG Y B, LI X H, YAO B X. 60 GHz pulse wireless communication system with TH-PAM multiple access scheme[J]. Telecommunication Science, 2016, 32(4): 17-23.
- [10] 戚星宇, 刘芫健, 李双德. 室内办公环境60 GHz频段毫米波接收功率仿真和分析[J]. 微型机与应用, 2016, 35(2): 63-65, 72.
QI X Y, LIU Y J, LI S D. Simulation and annlysis of millimeter-wave received power of indoor office environment[J]. Network and Communication, 2016, 35(2): 63-65, 72.
- [11] IMT-2020(5G) Promotion Group. The white paper of 5G wireless technology architecture[R]. 2015.
- [12] 殷俊. LTE 系统跨层资源分配算法研究[D]. 南京: 南京邮电

大学, 2009.

- YIN J. Research on cross layer resource allocation algorithm for LTE system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2009.
- [13] GARCIA G E, MUPPIRISETTY L S, WYMEERSCH H. On the trade-off between accuracy and delay in UWB navigation[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(1): 39-42.
- [14] SHEN C, TEKIN C, SCHAAR M V D. A non-stochastic learning approach to energy efficient mobility management[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, PP(99): 1.
- [15] CHEN X Q. Research on ultra wide-band indoor location system[C]//2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, November 15-17, 2012, Xi'an, China. [S.l.:s.n.], 2012: 871-873.
- [16] WANG X, GIANNAKIS G B. Resource allocation for wireless multiuser OFDM networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(7): 4359-4372.
- [17] GARCIA G E, MUPPIRISETTY L S, WYMEERSCH H. On the trade-off between accuracy and delay in UWB navigation[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(1): 39-42.
- [18] 何晓哲. 60 GHz 毫米波无线通信系统调制及信道容量分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- HE X Z. 60 GHz millimeter-wave wireless communication system: modulation and capacity research[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [19] MCELIECE R J. 信息论与编码理论[M]. 李斗, 殷悦, 罗燕, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004.

MCELIECE R J. Information theory and coding[M]. Translated by LI D, YIN Y, LUO Y, et al. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.

[作者简介]



李学华 (1977-), 女, 博士, 北京信息科技大学信息与通信工程学院副院长、教授, 主要研究方向为无线通信物理层关键技术。



沈琛 (1992-), 女, 北京信息科技大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为 60 GHz 无线通信关键技术。



姚媛媛 (1988-), 女, 博士, 北京信息科技大学信息与通信工程学院讲师, 主要研究方向为认知无线电、携能通信与资源分配。