



基于准恒包络正交频分复用的临近空间通信抗衰落技术

陆阳¹, 张东磊¹, 王婷婷²

(1. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209; 2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 针对临近空间高空平台功率受限、频谱资源紧张以及在非视距、低仰角环境下通信受多径衰落影响的问题, 提出了一种基于准恒包络正交频分复用的临近空间通信抗衰落技术。在发射端, 将两路正交频分复用信号分别调制在两路恒包络信号的相位上, 并通过移相将两路信号合并为一路; 在接收端, 通过泰勒级数展开技术将两路信号分开并解调。分析与仿真结果表明, 准恒包络正交频分复用具有与正交频分复用相同的频谱效率, 通过合理选择调制指数, 能够有效对抗多径衰落, 且信号峰均功率比低于 3 dB, 实现了高谱效、高能效的目标。

关键词: 临近空间通信; 高空平台; 准恒包络; 正交频分复用; 多径衰落; 峰均功率比

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019003

Anti-fading technology of near space communication based on quasi-constant envelope OFDM

LU Yang¹, ZHANG Donglei¹, WANG Tingting²

1. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: For the near space high altitude platform station (HAPS), its limited power, tight spectrum resources, and the multipath fading effects due to non line of sight (NLoS) and low elevation communication environment are the main problems. An anti-fading technology of near space communication based on quasi-constant envelope OFDM (QCE-OFDM) was proposed. At the transmitting end, two OFDM signals were respectively modulated on the phases of two constant envelope signals, and then they were merged into one signal via phase shift. At the receiving end, Taylor series expansion technology was employed to divide and demodulate the signal. Analysis and simulation results show that the QCE-OFDM has the same spectral efficiency as OFDM. By selecting the modulation index reasonably, the proposed scheme can combat multipath fading effectively with less than 3 dB signal peak-to-average power ratio (PAPR), where the goal of high spectral efficiency and high energy efficiency can be achieved.

Key words: near space communication, high altitude platform station, quasi-constant envelope, orthogonal frequency division multiplexing, multipath fading, peak-to-average power ratio

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2018-11-29

基金项目: 国家电网公司科技项目“基于高空平台(HAPS)的临近空间通信技术研究”(No.52110417001A)

Foundation Item: The Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGCC) “Research on Near Space Communication Technology Based on High Altitude Platform Station (HAPS)” (No.52110417001A)



1 引言

临近空间高空平台 (high altitude platform station, HAPS) 是携带相关载荷、执行特定任务并长时间停留在特定位置的飞行器。HAPS 高度通常在 20 km 左右, 由太阳能供电。临近空间通信系统的工作频段包括 S 频段与 Ka 频段, 具有覆盖范围广、通信容量大、传输时延小、系统造价低及配置灵活等优点^[1-2], 可用于偏远地区通信与应急通信^[3]。目前, 国内外均对临近空间通信开展了相关研究。2013 年, 谷歌 (Google) 公布了高空网络气球项目, 并完成了网络性能实验性测试; Facebook 设计了“天鹰”无人机, 用来为偏远地区提供网络接入。2015 年, 我国成功放飞“旅行者”号商用平台, 并完成了光学监控、天地高速通信等测试。同年, 我国自主研发的“圆梦号”飞艇也完成了 24 h 的试飞, 验证了 HAPS 系列关键技术。开展临近空间通信技术研究, 对未来构建“空天地”一体化网络具有深远的意义。

在临近空间通信系统中, HAPS 和地面终端之间可能存在多条信号传播路径, 尤其是在非视距 (non line of sight, NLoS) 和通信仰角较低时。多径传播的原因包括大气的反射、折射、建筑物或其他物体的反射等, 它导致信号在到达接收机时相互干涉, 形成幅度和相位都急剧变化的合并信号, 对 HAPS 通信性能造成很大影响。由于 HAPS 位置的特殊性, 其并不能直接使用现有地面系统或卫星系统的信道模型。因此, 选择合适的信道模型对临近空间通信中存在的路径损耗、多径衰落等进行建模十分重要。此外, 多载波调制技术通过将高速串行数据流转换为多个并行的低速数据流, 并调制到多个子载波上传输, 可以有效对抗信号因多径衰落而导致的符号间干扰。其代表性技术正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), 在地面移动通信

系统中已得到充分应用^[4], 基本思想是将速率较高的串行数据流分为多个并行的数据流, 调制在相互正交的子载波上进行传输。由于 OFDM 各个子载波相互正交, 各子载波可分别承载不同的信息, 且子载波之间不会产生干扰, 因此, OFDM 的频谱利用效率远远高于单载波调制。当信号受到多径效应影响时, 只有处于深衰落部分的子载波受到较大的影响, 其他子载波均受到较小的影响, 因此, OFDM 具有良好的抗多径能力。但由于 OFDM 信号是多个子载波信号的叠加, 信号的峰均功率比 (peak-to-average power ratio, PAPR) 通常较高^[5-7], 在实际系统中常采用输入功率回退来避免发射端功放失真, 从而导致较低的系统能量利用效率^[8-12]。上述因素使得直接将 OFDM 应用在依靠太阳能供电的 HAPS 是不适宜的。参考文献[13-14]提出了恒包络正交频分复用 (constant envelope OFDM, CE-OFDM), 通过相位调制实现了信号的恒包络, 即信号 PAPR 为 0 dB。但 CE-OFDM 要求所输入的 OFDM 信号为实数信号, 因此, 一半的子载波承载了冗余信号以构成共轭对称结构, 使得 CE-OFDM 的频谱效率仅为 OFDM 的 50%。

针对上述问题, 为实现 OFDM 在临近空间通信中的应用, 提高系统抗多径衰落的能力, 提出了一种基于准恒包络 OFDM (quasi-constant envelope OFDM, QCE-OFDM) 的临近空间通信抗衰落技术。通过在发射端将两路 CE-OFDM 信号移相合并为一路, 在接收端基于泰勒级数展开技术对信号进行解调, QCE-OFDM 的频谱效率得以提升至与 OFDM 相同, 同时保证了基带信号 PAPR 低于 3 dB, 有效避免了功放失真, 实现了兼具频谱利用效率与能量利用效率的临近空间可靠传输。

2 临近空间通信系统模型

临近空间通信系统模型如图 1 所示, 考虑以

HAPS 为发射端,地面终端为接收端的下行通信链路。HAPS 的发射信号表示为 $x(t)$, 根据无线信号传播原理,地面终端接收到的信号 $r(t)$ 可表示为:

$$r(t) = h(t) * x(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, $h(t)$ 表示信道冲激响应, $*$ 为卷积运算, $n(t)$ 为加性白噪声, 服从均值为 0、方差为 N_0 的高斯分布。

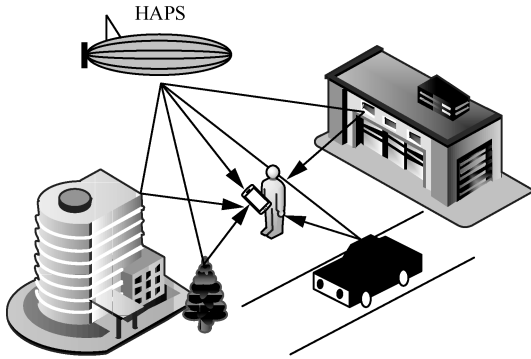


图1 临近空间通信系统模型

HAPS 位于平流层,信号在临近空间通信系统中传播经历的损耗或衰落主要包括大气吸收、闪烁、路径损耗、雨衰和多径衰落等。在晴空条件下,影响因素主要为路径损耗和多径衰落。3GPP 提案 RP-172276^[15]给出了 HAPS 通信系统中路径损耗的计算方法,该方法适用于 S 频段与 Ka 频段。该提案认为当信号在高于某一高度 h_v 的空间中传播时,其路径损耗可由自由空间传播模型表示;当信号在低于该高度 h_v 的空间中传播时,建筑物及地面物体等会对信号造成额外损耗,损耗指数为 n 。 h_v 与 n 的取值由具体环境决定。因此, HAPS 路径损耗的计算式可表示为:

$$\begin{aligned} \text{PL} = & \text{FSPL}(h_0) + 10(n-2)\lg h_v \\ & - 10n\lg \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

其中, FSPL 表示自由空间传播模型的路径损耗, h_0 为 HAPS 高度, α 为平台通信仰角。

在临近空间通信系统中, HAPS 和地面终端之间可能存在多条信号传播路径,多径效应

的存在会严重影响 HAPS 系统的通信性能^[16-17]。

参考文献[18]基于几何单反射(geometry based single-bounce, GBSB)模型,并结合临近空间信道特征,提出了一个 3D GBSB 参考模型,并在模型中综合考虑了平台通信仰角、天线配置、多普勒扩展、散射物分布和平台位移等参数对信号传播的影响,该模型的信道冲激响应表示为:

$$h(t) = \sqrt{\frac{K}{K+1}} h_{\text{LoS}}(t) + \sqrt{\frac{1}{K+1}} h_{\text{NLoS}}(t) \quad (3)$$

其中, $h_{\text{LoS}}(t)$ 为发射端与接收端之间视距(line of sight, LoS)条件下的信道响应, $h_{\text{NLoS}}(t)$ 为非视距条件下的信道响应, K 为莱斯因子。 $h_{\text{LoS}}(t)$ 与 $h_{\text{NLoS}}(t)$ 的计算式如下:

$$h_{\text{LoS}}(t) = \sqrt{\frac{K\Omega}{K+1}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(\text{T,R})} \times e^{j2\pi f_{\text{T,max}} \cos(\pi - a_{\text{LoS}}^{\text{Rl}} - \gamma_{\text{T}}) + f_{\text{R,max}} \cos(a_{\text{LoS}}^{\text{Rl}} - \gamma_{\text{R}})} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} h_{\text{NLoS}}(t) = & \sqrt{\frac{\Omega}{K+1}} \\ & \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} g^{(n)} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[d(\text{T}, S^{(n)}) + d(S^{(n)}, \text{R})]} \\ & e^{j\varphi^{(n)}} \cdot e^{j2\pi[f_{\text{T,max}} \cos(a_{\text{T}}^{(n)} - \gamma_{\text{T}}) + f_{\text{R,max}} \cos(a_{\text{R}}^{(n)} - \gamma_{\text{R}}) \cos \beta_s^{(n)}]} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\Omega = E[|h(t)|^2] \leq 1$, T 和 R 分别表示发射机和接收机, $d(a, b)$ 表示 a 和 b 两点之间的距离。 $a_{\text{LoS}}^{\text{Rl}}$ 表示 LoS 路径到达波的方位角, γ_{T} 和 γ_{R} 分别表示发射机和接收机的运动角。 $f_{\text{T,max}} = v_{\text{T}}/\lambda$ 与 $f_{\text{R,max}} = v_{\text{R}}/\lambda$ 分别表示发射机和接收机速度为 v_{T} 和 v_{R} 时的最大多普勒频移, λ 为载波波长。 N 为散射体个数, $g^{(n)}$ 表示第 n 个散射波的幅度, $S^{(n)}$ 表示第 n 个散射体。相位 $\varphi^{(n)}$ 是均匀分布在 $[-\pi, \pi)$ 之间的随机变量, $a_{\text{T}}^{(n)}$ 和 $a_{\text{R}}^{(n)}$ 分别代表从发射机撞击到散射体 $S^{(n)}$ 的信号离开方位角以及从散射体 $S^{(n)}$ 散射到接收机的信号的到达方位角, $\beta_s^{(n)}$ 表示第 n 个散射体相对于接收机的仰角。



综上所述, 由式 (2) 和式 (3), 临近空间通信系统中的信道增益矩阵 $H(t)$ 可表示为:

$$H(t) = \frac{h(t)}{\sqrt{PL}} \quad (6)$$

3 准恒包络正交频分复用技术

OFDM 技术的 PAPR 较高, 为避免发射端功放失真需进行输入功率回退, 导致系统能量利用效率较低。虽然 CE-OFDM 技术能提供 0 dB 的 PAPR, 但是其频谱利用率相比 OFDM 技术下降了 50%。鉴于临近空间高空平台功率受限、频谱资源紧张, 为提高其频谱、能量利用效率, 推进 OFDM 技术在临近空间通信系统中的应用, 降低多径效应对系统性能的影响, 提出了一种基于 QCE-OFDM 的临近空间通信抗衰落技术。QCE-OFDM 信号的生成过程如图 2 所示。首先, 产生两路相互独立的信号 (信号 1 与信号 2), 经过串并变换、符号映射、构造共轭对称序列、逆快速傅里叶变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 及相位调制, 生成两路 CE-OFDM 信号。然后, 将其中一路信号 (信号 2) 移相, 并与另一路信号 (信号 1) 相加, 合并为一路信号。最后, 添加循环前缀 (cyclic prefix, CP), 并进行功率放大、数模转换 (digital to analog converter, DAC) 后发送到信道。接下来对 QCE-OFDM 信号调制过程进行详细分析。

假设经过符号映射后两个支路的数据符号分别为 $m_1(k)$ 与 $m_2(k)$, $k = 1, 2, \dots, M$, 其中, M 为每一路的数据符号个数。通过共轭对称序列模块后, 各个支路的信号可表示为^[19]:

$$\begin{aligned} m_1(k) &= [0, m_1(1), m_1(2), \dots, m_1(M), \\ &0_{1 \times N_z}, m_1^*(M), \dots, m_1^*(2), m_1^*(1)] \\ m_2(k) &= [0, m_2(1), m_2(2), \dots, m_2(M), \\ &0_{1 \times N_z}, m_2^*(M), \dots, m_2^*(2), m_2^*(1)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $0_{1 \times N_z}$ 为零向量。由式 (7) 可以看出, 在为了得到实数 OFDM 信号而构造的共轭对称序列结构中, 有一半信息为冗余信息, 因此, 信号的频谱效率降低了 50%。令上述共轭对称序列长度为 N , 则分别进行 IFFT 后得到的 OFDM 信号为:

$$\begin{aligned} M_1(n) &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} m_1(k) \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) \\ M_2(n) &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} m_2(k) \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

经过相位调制模块后, 信号进一步可表达为:

$$\begin{aligned} s_1(n) &= A e^{j2\pi h_1 M_1(n)} \\ s_2(n) &= B e^{j2\pi h_2 M_2(n)} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, A 、 B 和 $2\pi h_1$ 、 $2\pi h_2$ 分别表示各个支路的幅度和调制指数。将两路信号进行移相复用, 得到的 QCE-OFDM 信号可表示为:

$$s(n) = s_1(n) - j s_2(n) \quad (10)$$

从式 (10) 可以看出, 移相复用操作使得两路信号合二为一, 在相同的频率资源上传输了两路 CE-OFDM 信号, 从而将信号的频谱利用效率提升至 CE-OFDM 频谱效率的两倍。QCE-OFDM 信号 $s(n)$ 的发射功率为:

$$\begin{aligned} |s(n)|^2 &= |s_1(n) - j s_2(n)|^2 \\ &= [A \cos 2\pi h_1 M_1(n) + B \sin 2\pi h_2 M_2(n)] + \\ &\quad j [A \sin 2\pi h_1 M_1(n) - B \cos 2\pi h_2 M_2(n)]^2 \\ &= A^2 + B^2 + 2AB \sin(2\pi h_2 M_2(n) - \\ &\quad 2\pi h_1 M_1(n)) \end{aligned} \quad (11)$$

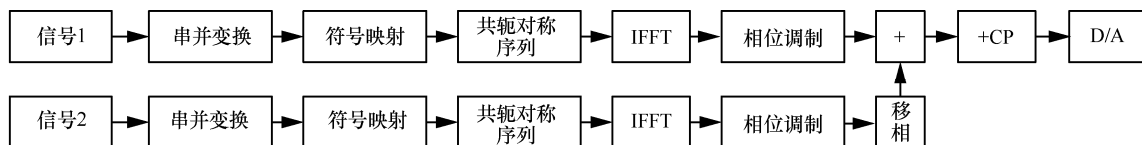


图2 QCE-OFDM 信号的生成过程

从式(11)可以看出, $s(n)$ 包络的变化范围由 $\sin(2\pi h_2 M_2(n) - 2\pi h_1 M_1(n))$ 决定, 根据正弦函数的统计特性可知, QCE-OFDM 信号的 PAPR 在统计上为 3 dB。通过以上理论分析可知, 所提出的 QCE-OFDM 技术可将信号的频谱利用效率提升至 CE-OFDM 技术的两倍, 并保证信号的 PAPR 低于 3 dB, 从而提高了 HAPS 系统的能量利用效率。

4 仿真验证

对基于 QCE-OFDM 的临近空间通信性能进行仿真, 并与采用 OFDM、CE-OFDM 技术时的误比特率 (bit error rate, BER)、信号 PAPR 进行比较。在 QCE-OFDM 仿真中, 接收端采用了参考文献[20-21]中提出的基于泰勒级数展开的解调结构, 该结构能够减小门限效应对相位解调的影响, 从而有效提高系统的 BER 性能。OFDM 技术的仿真采用参考文献[5]提出的经典迭代限幅滤波结构 (clipping and filtering structure, CFS) 以降低信号的 PAPR。仿真中采用的信道模型分别为如式(6)所示的临近空间通信系统信道模型以及加性高斯白噪声 (additive white gaussian noise, AWGN) 模型。假设 HAPS 高度为 20 km, 散射物存在半径为 200 m, 存在高度为 100 m。

QCE-OFDM 信号的调制指数有 3 种: Case1, $2\pi h_1 = 2\pi h_2 = 0.2$; Case2, $2\pi h_1 = 2\pi h_2 = 0.4$; Case3, $2\pi h_1 = 2\pi h_2 = 0.9$ 。CE-OFDM 信号的调制指数分类与 QCE-OFDM 信号相同, 即 Case1, $2\pi h = 0.2$; Case2, $2\pi h = 0.4$; Case3, $2\pi h = 0.9$ 。

图 3 对 AWGN 信道下 OFDM、CE-OFDM、QCE-OFDM 技术的误比特率性能进行了仿真, 其中, CE-OFDM 与 QCE-OFDM 的调制指数包括 Case1、Case2 与 Case3。从图 3 中可以看出, OFDM、CE-OFDM、QCE-OFDM 技术的传输误比特率均随着发射端信噪比的增大而下降, 并且当 CE-OFDM 与 QCE-OFDM 技术调制指数为 0.2

(Case1) 时, 两者的误比特率高于 OFDM 信号的误比特率, 当 CE-OFDM 与 QCE-OFDM 技术调制指数为 0.4 (Case2) 时, 两者的误比特率接近于 OFDM 信号的误比特率, 当 CE-OFDM 与 QCE-OFDM 技术调制指数为 0.9 (Case3) 时, 两者的误比特率低于 OFDM 信号的误比特率。此外, 当调制指数较小 (Case1、Case2) 时, QCE-OFDM 信号的误比特率性能与 CE-OFDM 相差不大; 当调制指数较大 (Case3) 时, QCE-OFDM 信号的误比特率性能与 CE-OFDM 相差较大, 尤其是当 SNR 较大时。

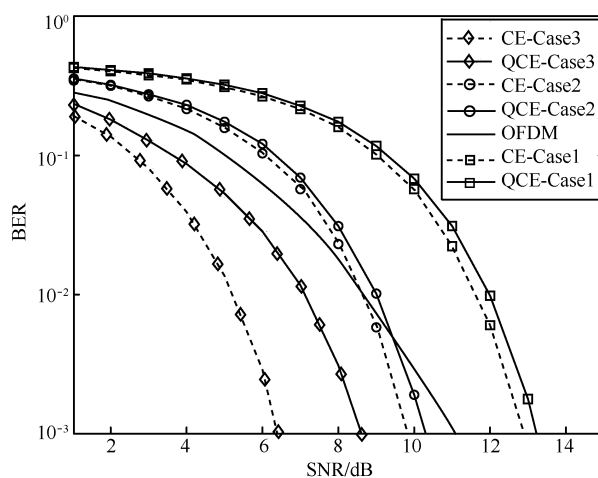


图 3 AWGN 信道下的误比特率性能对比

图 4 对临近空间多径信道下 OFDM、CE-OFDM、QCE-OFDM 技术的误比特率性能进行了仿真, 其中, CE-OFDM 与 QCE-OFDM 的调制指数包括 Case1、Case2 与 Case3。从图 4 中可以看出, OFDM、CE-OFDM、QCE-OFDM 技术的传输误比特率均随着发射端信噪比的增大而下降, 并且当 CE-OFDM 与 QCE-OFDM 技术调制指数为 0.2 (Case1) 时, 两者的误比特率高于 OFDM 信号的误比特率, 当 CE-OFDM 与 QCE-OFDM 技术调制指数为 0.4 (Case2) 时, 两者的误比特率接近于 OFDM 信号的误比特率, 当 CE-OFDM 与 QCE-OFDM 技术调制指数为 0.9 (Case3) 时, 两者的误比特率低于 OFDM 信号的误比特率。此



外, 当调制指数较小 (Case1、Case2) 时, QCE-OFDM 信号的误比特率性能与 CE-OFDM 相差不大; 当调制指数较大 (Case3) 时, QCE-OFDM 信号的误比特率性能与 CE-OFDM 相差较大, 尤其是当 SNR 较大时。通过上述分析可以看出, 在临近空间多径信道下, QCE-OFDM 信号的误比特率性能随着调制指数的增大而逐渐改善, 当调制指数较大 (Case3) 时, QCE-OFDM 信号在多径信道下的误比特率性能比 OFDM 信号更好, 这表明 QCE-OFDM 信号可有效抑制临近空间通信中存在的多径效应, 改善信号传播误比特率。

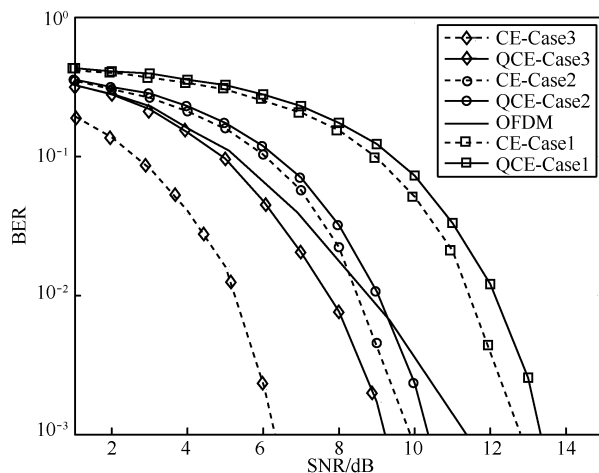


图4 临近空间多径信道下的误比特率性能对比

图5对OFDM与QCE-OFDM系统发射信号的PAPR特性进行了统计, 即具体评估经过OFDM、QCE-OFDM调制后信号PAPR的统计特性, 信号未经过信道。仿真中, QCE-OFDM的调制指数包括0.2 (Case1)、0.4 (Case2)与0.9 (Case3)。从仿真结果中可以看出, QCE-OFDM信号的PAPR随着调制指数的增大而增大, 且其最大值小于3 dB。从QCE-OFDM信号PAPR表达式(11)中可以看出, $A^2 + B^2$ 是直流分量, 是对信号功率的整体提升, 对信号的PAPR没有影响, QCE-OFDM信号的PAPR主要由正弦函数部分 $2AB \sin(2\pi h_2 M_2(n) - 2\pi h_1 M_1(n))$ 决定。当调

制指数增大时 (如仿真中的Case3, $2\pi h_1 = 2\pi h_2 = 0.9$), 正弦函数部分的峰值会增大, 而正弦函数的均值不会变化, 因此QCE-OFDM信号的PAPR会随着调制指数的增大而增大。当调制指数为0.2 (Case1) 时, QCE-OFDM信号的PAPR主要分布在0.5~1.2 dB; 当调制指数为0.4 (Case2) 时, QCE-OFDM信号的PAPR主要分布在1~2 dB; 当调制指数为0.9 (Case3) 时, QCE-OFDM信号的PAPR主要分布在1.6~3 dB。OFDM信号的PAPR主要分布在2.9~3.6 dB。因此, QCE-OFDM的PAPR维持在3 dB以内, 是一种准恒包络多载波技术。

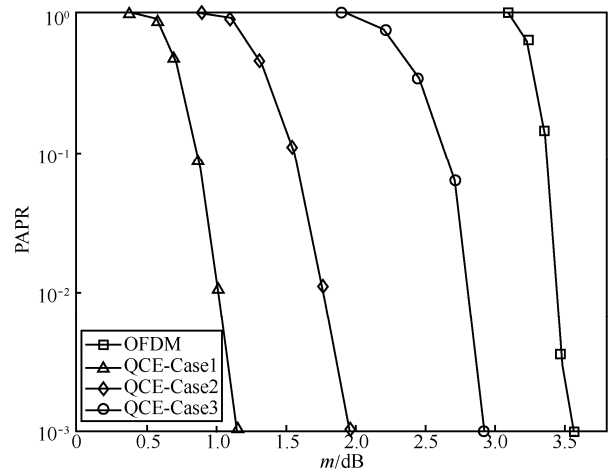


图5 OFDM与QCE-OFDM的PAPR性能对比

通过仿真结果的比较与分析得出, QCE-OFDM的BER与PAPR均受调制指数影响, 随着调制指数增加, BER逐渐下降, PAPR逐渐增大。因此, 通过合理选择调制指数, 可以实现QCE-OFDM技术在BER与PAPR之间取得折中。在此基础上, 与CE-OFDM相比, QCE-OFDM虽在一定程度上牺牲了BER、PAPR, 但使频谱利用效率获得两倍提升; 与OFDM相比, QCE-OFDM不但具有与其相同的频谱效率, 而且可以改善临近空间通信系统在多径信道下的传输质量, 并将PAPR维持在3 dB以下的更低水平。

5 结束语

针对临近空间通信功率受限、频谱资源紧张以及非视距、低仰角环境下受多径衰落影响的问题,提出了一种基于 QCE-OFDM 的临近空间通信抗衰落技术。QCE-OFDM 将两路 CE-OFDM 信号移相复用为一路信号,将信号的频谱效率提升至与 OFDM 相同。同时, QCE-OFDM 将信号的 PAPR 维持在 3 dB 以下,可以有效避免发射端功放失真,相比 OFDM 提高了 HAPS 系统的能量利用效率。通过将 OFDM、CE-OFDM 和 QCE-OFDM 技术进行仿真对比,验证了 QCE-OFDM 技术应用于临近空间通信抗衰落的有效性。

参考文献:

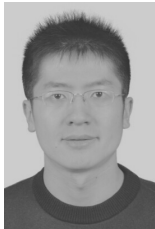
- [1] SUDHEESH P G, MOZAFFARI M, MAGARINI M, et al. Sum-rate analysis for high altitude platform (HAP) drones with tethered balloon relay[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(6): 1240-1243.
- [2] TANG S Z, YAN D W, YOU P, et al. Multi objective optimization deployment of HAP broadband communication networks[C]//*IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, May 6-8, 2017, Guangzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2017: 436-442.
- [3] XU D J, YI X H, CHEN Z H, et al. Coverage ratio optimization for HAP communications[C]//*IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Oct 8-13, 2017, Montreal, QC, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [4] 田清华. 基于 OFDM 的高速移动无线通信系统及宽带卫星通信系统关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
TIAN Q H. Research on key technologies of wireless communication in high-speed environment and broadband satellite communication based on OFDM[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [5] ARMSTRONG J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering[J]. *Electronics letters*, 2002, 38(5): 246-247.
- [6] LEKOUAGHET B, HIMEUR Y, BOUKABOU A, et al. A novel clipping based μ -law companding scheme for PAPR reduction over powerline communication[C]//*Seminar on Detection Systems Architectures and Technologies (DAT)*, Feb 20-22, 2017, Algiers, Algeria. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [7] KUMAR V B, PRASAD K Y. Reduction of PAPR and BER by using golay sequences for OFDM system[J]. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2014, 2(7): 191-198.
- [8] PANDEY P, TRIPATHI R. Performance analysis of peak-to-average power ratio (PAPR) reduction techniques in an OFDM system[C]//*Third International Conference on Computer and Communication Technology*, Nov 23-25, 2012, Allahabad, India. Piscataway: IEEE Press, 2012: 245-249.
- [9] JI J W, REN G L, ZHANG H N. A semi-blind SLM scheme for PAPR reduction in OFDM systems with low-complexity transceiver[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(6): 2698-2703.
- [10] JOSHI A, NIGAM K, BANSAL S. Iterative-grouping and image PTS for PAPR reduction in OFDM system[C]//*3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Feb 11-12, 2016, Noida, India. Piscataway: IEEE Press, 2016: 195-199.
- [11] NI C X, MA Y H, JIANG T. A novel adaptive tone reservation scheme for PAPR reduction in large-scale multi-user MIMO-OFDM systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(5): 480-483.
- [12] 胡登鹏, 张尔扬. 利用虚拟子载波抑制 OFDM 系统 PAPR 及其低复杂度算法[J]. *信号处理*, 2010, 26(3): 394-399.
HU D P, ZHANG E Y. PAPR reduction for OFDM system with dummy subcarrier and its low complexity algorithm[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(3): 394-399.
- [13] THOMPSON S C. Constant envelope OFDM phase modulation[D]. San Diego: University of California, 2005.
- [14] CHUNG C D. Spectral precoding for constant-envelope OFDM[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(2): 555-567.
- [15] 3GPP TSG RAN. NR-NTN: channel modeling: RP-172276 [S]. 2017.
- [16] XU Y Y, XIA X C, XU K, et al. Three-dimension massive MIMO for air-to-ground transmission: location-assisted precoding and impact of AoD uncertainty[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 15582-15596.
- [17] ITU-R. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods: P. 838-3 [S]. 2005.
- [18] LIAN Z X, JIANG L G, HE C. A 3-D GBSM based on isotropic and non-isotropic scattering for HAP-MIMO channel[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(5): 1090-1093.
- [19] CUI G F, WANG C, WANG W D. Iterative detection with amplitude-phase demodulator for dual-stream CE-OFDM[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(9): 2001-2004.
- [20] 王程. 卫星移动通信系统多载波传输技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
WANG C. Research on multicarrier transmission technique for



mobile satellite communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.

- [21] WANG C, CUI G F, WANG W D. Dual-stream transceiver structure with single antenna for phase-modulated OFDM[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1756-1759.

[作者简介]



陆阳（1984—），男，博士，全球能源互联网研究院有限公司高级工程师，主要从事电力通信新技术研究工作。



张东磊（1986—），男，全球能源互联网研究院有限公司工程师，主要从事电力通信技术应用研究工作。



王婷婷（1993—），女，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线通信技术。