

利用混合 RF-FSO 系统改善深空通信的研究

刘宏展^{1,2}, 姜婷¹, 郝源¹

(1. 华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006;
2. 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 为了改善深空通信质量, 在深空中引入了混合 RF-FSO 系统以及混合 LPPM-BPSK-SIM 调制。在不同太阳风波动的环境中, 对比分析了采用混合 RF-FSO 系统与 FSO 系统的误码率特性。仿真结果表明, 深空通信中, 采用混合 RF-FSO 系统的误码率低于传统 FSO 系统。当采用混合 LPPM-BPSK-SIM 时, 系统性能又得到进一步提升。

关键词: 深空通信; 混合 RF-FSO 系统; 混合 LPPM-BPSK-SIM; 误码率

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020185

Research on improving deep space communication using hybrid RF-FSO system

LIU Hongzhan^{1,2}, JIANG Ting¹, HAO Yuan¹

1. School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Guangzhou 510006, China

Abstract: In order to improve the quality of deep space communication, a mixed RF-FSO system and hybrid LPPM-BPSK-SIM scheme were introduced in deep space. The bit error rate of the hybrid RF-FSO system and the FSO system were compared and analyzed under the impact of solar wind fluctuation. The simulation results indicate that the deep space communication system achieves better bit error rate performance by using hybrid RF-FSO system, and the system performance can be further enhanced by adopting hybrid LPPM-BPSK-SIM.

Key words: deep space communication, mixed RF-FSO system, hybrid LPPM-BPSK-SIM, bit error rate

1 引言

随着科技的进步和发展, 世界各国对宇宙的探索愈发深入, 深空通信也成了各国关注的科研热点。深空通信包括太阳系内的星间通信、空间站与星球间通信和超出太阳系的长远距离通信。由于通信距离较远、信号衰减大、链路情况复杂、对探测接收设备要求较高等, 深空通信目前存在衰落严重、时延大、接收困难等一系列问题。

深空通信与常见的地面通信和低轨卫星通信最大的不同点在于, 常见的地面通信和低轨卫星通信受地球表面的大气环境以及建筑物影响较大, 而

深空通信的信号受太阳活动影响较大, 因此, 研究太阳闪烁成为研究深空通信的重要理论基础。通过太阳闪烁研究信号的衰落, 进而分析深空通信性能是当前研究的具体方向之一。

20 世纪 50 年代, 研究者开始利用闪烁对太阳风情况进行观测。20 世纪 70 年代发展为利用无线电信号来探测太阳风中的电子密度^[1], 以及利用多普勒闪烁探测行星之间的光波等^[2]。20 世纪以来, 随着深空通信的发展, 太阳闪烁对深空通信的重要影响被越来越多的研究者关注^[3]。2017 年, 徐冠军等^[4]基于 Rytov 近似推导了行星上合期间深空闪烁模型, 随后利用该模型对比分析了不同调制

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61875057, No.61475049)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61875057, No.61475049)

在深空通信中的误码率^[5-6]，并将混合调制方式应用于深空通信中^[7]，通过仿真模拟了深空中混合调制方式的误码率特性，并研究了深空通信参数与调制方式之间的关系。迄今为止，深空通信中相关研究都是以自由空间光（FSO, free space optics）通信系统为基础，但是深空通信受到不规则的太阳风、长距离的衰落，以及地球周围大气层的影响，因此单一的 FSO 信道模型已经不足以充分描述深空通信的特征。Xu 等^[8]在最新的研究中提出可以采用混合 RF-FSO 系统来改善深空通信性能，而现阶段还没有相关研究。

Lee 等^[9]首次提出将射频通信（RF, radio frequency）和 FSO 通信结合形成混合 RF-FSO 系统的方案，并将 2 种通信系统通过中继技术结合起来，推导了 RF 信道服从瑞利分布、FSO 信道服从 Gamma-Gamma 分布时系统的中断概率的理论表达式，并利用仿真验证了理论推导，该项研究也受到了众多研究者的关注。张韵等^[10]研究了 RF-FSO 系统服从 Nakagami- m /指数韦伯分布的情况，推导了混合 RF-FSO 系统端到端的概率密度函数（PDF, probability density function）表达式，并研究了混合系统误码率和中断概率性能。乔志等^[11]研究了混合 RF/FSO 系统的中断性能，并利用蒙特卡洛仿真验证了推导结果的准确性。Ansari 等^[12]提出瑞利/Gamma-Gamma 模型，在不同强度湍流的模拟上具有较高的拟合性，利用该系统模型研究混合 RF-FSO 系统中断概率、误码率、信道容量的结论得到众多研究者的认可。上述研究从中断概率、误码率和信道容量等方面分别研究了混合 RF-FSO 系统性能，并得出以下结论：混合 RF-FSO 系统结合了 RF 通信和 FSO 通信的优点，具有高速率、高带宽、不受频谱限制、受大气干扰小等特性，但是目前针对该系统的研究还未涉及深空环境。

基于以上研究，本文提出将混合 RF-FSO 系统应用于深空通信中的方案，混合 RF-FSO 系统采用瑞利/Gamma-Gamma 分布模型。首先对深空通信的物理特征和混合系统的结构进行分析，其次对深空通信误码率进行仿真，最后根据仿真结果得出结论。

2 理论研究

2.1 幅度闪烁

在深空通信中，星体之间存在相互运动，除了形成多普勒效应外，还存在着行星聚合的状态，其

中行星聚合状态分为行星上合和行星下合，具体如图 1 所示^[13]。行星上合时地球与空间站距离最远，此时太阳到地球与空间站到地球的夹角（SEP, sun-earth-probe）最小为 0° ，即 $\alpha=0^\circ$ ；行星下合时地球和空间站距离最近，本文主要讨论行星上合的情况。

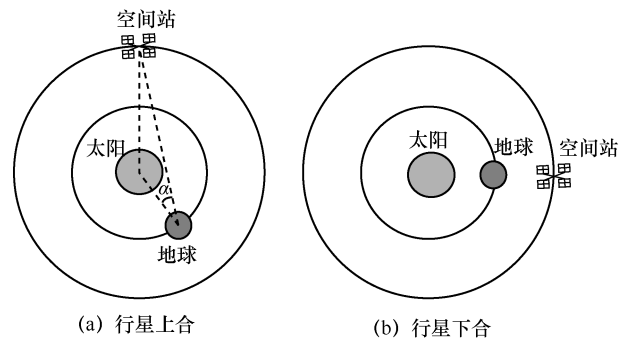


图 1 行星聚合状态示意

行星上合时地球与空间站的距离最远，地球到空间站之间的通信链路距太阳最近，此时受到太阳活动的影响最大。载有信号的电磁波经过太阳日冕区，信号受到日冕区的太阳风抛射的带电粒子影响，通信质量严重受损。日冕区是深空环境的重要组成部分，其受太阳核反应变化的影响逐渐向外喷发出太阳风等离子体并延伸至整个行星际和地球外层空间^[14]。太阳风等离子体密度是描述日冕区干扰情况的重要参数，具体表现为太阳风湍流的不规则性。2000 年 Cassini 号的探测数据也表明，太阳风等离子体密度与深空通信误码率之间有着紧密联系^[15]。

当载有信号的电磁波穿过日冕区时，这些分布不均匀且高密度的太阳风等离子体会对信号的幅度、相位、频谱等方面产生影响，这种影响也被称作深空通信中的闪烁现象，根据闪烁对象的不同，分别产生幅度闪烁、相位闪烁和频谱扩展现象。本文讨论信号幅度闪烁，并用闪烁指数 m 来描述信号受到干扰的大小。从图 1 中可以看出，太阳中心与通信链路的径向距离与 SEP 相关。两者具体关系为 $R=L_{sc} \sin \alpha$ ， R 为太阳中心与通信链路的径向距离， $L_{sc}=1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ 为太阳中心到地球的距离。

Afanasiev 等^[16]根据观测数据得出结论，虽然一个周期内太阳活跃程度不同，但等离子体密度与太阳中心点到通信链路的垂直距离密切相关，由此拟合出太阳风等离子体密度的统一表达式为

$$n_e(R) = a_1 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{b_1} + a_2 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{b_2} \quad (1)$$

其中, R_0 为太阳半径, 约为 $6.96 \times 10^5 \text{ km}$, 参数 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 的值与太阳活跃程度相关, 本文根据中国地区探测到的太阳活动的相关数据^[17], 拟合参数依次为 $a_1 = 2.39 \times 10^{14}$ 、 $a_2 = 1.67 \times 10^{12}$ 、 $b_1 = -6$ 、 $b_2 = -2.3$, 所以等离子体密度分布为

$$n_e(R) = 2.39 \times 10^{14} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-6} + 1.67 \times 10^{12} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-2.3} \quad (2)$$

通常用闪烁指数 m 来衡量大气湍流对通信的干扰程度, 它被定义为信号强度起伏的均方根与强度均值之比。当信号幅度起伏越大时, m 越大表示大气干扰较大, 归一化后的强度起伏方差为

$$m^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad m \leq 1; \quad \text{当 } m \text{ 趋于 } 1 \text{ 时, 干扰}$$

较大。通常将 $m < 0.3$ 时称为弱闪烁状态^[18-19]。

Ho 等^[20]给出了弱闪烁情况下的闪烁指数的经验公式, 即

$$m = a_0 f^{-1.42} e \quad (3)$$

其中, $e = 5.9 \int_0^\infty n_e(r) dr$ 为从太阳中心点到通信链路的径向路径上的总电子数, $a_0 = 2.07 \times 10^{-20}$, f 为载波频率 (单位是 GHz)。经计算可得

$$e = 1.35 \times 10^{23} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-5} + 2.1 \times 10^{21} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-1.3} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 得到弱闪烁下闪烁指数的经验公式为

$$m = 2.07 \times 10^{-20} f^{-1.42} \cdot \left(1.35 \times 10^{23} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-5} + 2.1 \times 10^{21} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-1.3} \right) \quad (5)$$

在弱闪烁下, 闪烁指数和激光信号幅度起伏方差的关系^[21]为

$$m^2 = 4\sigma_i^2 \quad (6)$$

图 2 是不同载波频率下深空通信中归一化的闪烁指数与 SEP 的关系。从图 2 中可以看出, SEP 越小, 闪烁指数越大。换言之, 距离太阳越近, 受到的介质干扰越强烈, 在靠近日心时湍流强度呈饱和状态。闪烁指数与 SEP 并非线性关系, 当 SEP 增

大到一定程度后, 闪烁指数迅速减小。这说明, 太阳风等离子体分布并不均匀, 越靠近太阳, 等离子体密度越大, 对通信的影响越大; 当太阳与通信链路距离达到一定值时, 等离子体密度迅速降低, 信道干扰迅速降低。此外, 当 SEP 一定时, 载波频率越大, 闪烁指数 m 越小。当载波频率为 8.4 GHz、SEP 大于 2.1° 时, m 小于 0.3, 为弱闪烁情况; 当载波频率为 2.4 GHz、SEP 大于 8° 时, m 才小于 0.3。因此, 当其他条件一定时, 选择频率更高的载波有利于降低信号受到的干扰, 从而改善信号传输质量。

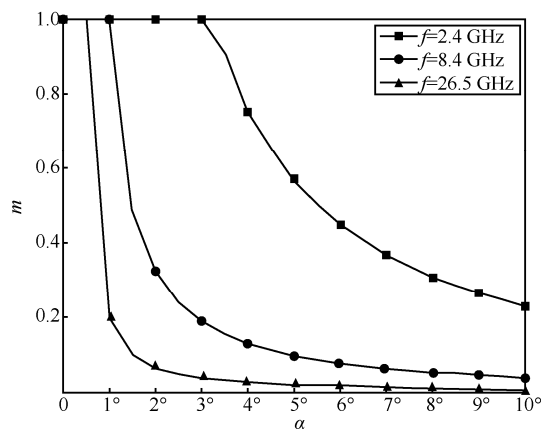


图 2 不同载波频率下深空通信中归一化的闪烁指数与 SEP 的关系

2.2 混合 RF-FSO 系统结构

本文研究了一个双跳混合 RF-FSO 系统, 主要由 3 个部分组成: 发射端, 中继系统和接收端。具体的系统模型如图 3 所示。信号从发射端发出, 经过 RF 链路后被中继系统接收, 其中 RF 链路服从瑞利分布。中继系统接收到信号后对信号进行处理, 然后发射出去, 被发射的信号通过服从 Gamma-Gamma 分布的 FSO 链路传输到接收端, 被接收器探测接收。出于对系统复杂度的考虑, 本文的中继系统采用的是放大转发技术, 接收端采用直接探测的方式。

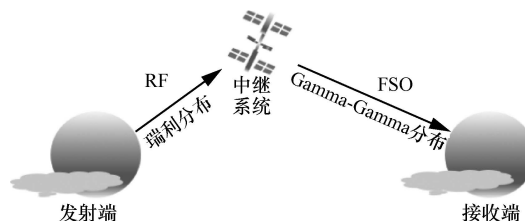


图 3 双跳混合 RF-FSO 系统模型

中继系统接收到的信号为 $y_1(t) = h_1 x_1(t) +$

$n_1(t)$ ，接收端接收到的信号为 $y_2(t) = h_2 G(h_1 x_1(t) + n_1(t)) + n_2(t)$ ，其中， $x_1(t)$ 为信号源发射出的信号， h_1 和 h_2 分别为 RF 信道和 FSO 信道的衰落系数， $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 分别是 RF 信道和 FSO 信道中功率为 N_{01} 和 N_{02} 的加性高斯白噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise)。当中继系统采用放大转发技术时，中继系统将接收到的信号 $y_1(t)$ 放大 G 倍，然后将其发送至接收端，其中， G 为放大增益。

本文中，混合 RF-FSO 系统的 RF 链路服从瑞利分布，其概率密度函数为 $f(\gamma_1) = \frac{1}{\gamma_1} \exp\left(-\frac{\gamma_1}{\gamma_1}\right)$ ，其中， γ_1 表示 RF 链路的实时信噪比， $\bar{\gamma}_1$ 表示 RF 链路的平均信噪比，联合概率密度为 $F_1(\gamma_1) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_1}{\bar{\gamma}_1}\right)$ 。

FSO 链路服从 Gamma-Gamma 分布，考虑指向误差时，其概率密度函数^[22]为

$$f_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\xi^2}{2\gamma_2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left(\alpha \beta \sqrt{\frac{\gamma_2}{\xi^2}} \left| \frac{\xi^2 + 1}{\xi^2}, \alpha, \beta \right. \right) \quad (7)$$

其中， γ_2 表示 FSO 链路的实时信噪比， $\bar{\gamma}_2$ 表示 FSO 链路的平均信噪比； α 表示大尺度湍流参数， β 表示小尺度湍流参数； $\xi = \frac{\omega_e}{2\sigma_s}$ 表示指向误差参数， ω_e 表示束腰半径， σ_s 表示光束与接收器的位移标准差； $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数； $G(\cdot)$ 表示 Meijer G 函数，3、0、1、3 分别表示 Meijer G 函数的相关参数^[23]。为考虑到接收孔径对信号的影响，采用光辐射为球面波的模型， α 和 β 具体为^[24]

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49 \sigma_i^2}{\left(1 + 0.18 d^2 + 0.56 \sigma_i^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51 \sigma_i^2 (1 + 0.69 \sigma_i^{\frac{12}{3}})^{\frac{-5}{6}}}{\left(1 + 0.9 d^2 + 0.62 d^2 \sigma_i^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (9)$$

其中， σ_i^2 为对数光强起伏方差， $d = \left(\frac{k D_m^2}{4 L_m} \right)^{\frac{1}{2}}$ ，

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为光波数， D_m 和 L_m 分别为接收器孔径和通

信距离的大小，本文中 $\frac{D_m^2}{L_m} \approx 0$ ， λ 为载波波长。

当中继系统采用放大转发技术时，点对点的双跳系统接收端信噪比为 $\gamma = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{C + \gamma_2}$ ，其中 C 是与增益 G 相关的常数，本文仿真中设为定值 1。由混合 RF-FSO 系统的联合概率密度函数定义 $F_\gamma(\gamma) = \Pr\left(\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + C} < \gamma\right)$ ，得

$$F_\gamma(\gamma) = \int_0^\infty \Pr\left(\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + C} < \gamma \mid \gamma_2\right) f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 = \int_0^\infty F_1\left(\frac{\gamma(\gamma_2 + C)}{\gamma_2}\right) f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \quad (10)$$

利用 $\Gamma(g, x) = \int_0^x t^{g-1} e^{-t} dt$ ，式(10)可写作

$$F_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(1)} \int_0^\infty \Gamma\left(1, \frac{\gamma_{th}(\gamma_2 + C)}{\gamma_1 \gamma_2}\right) \frac{\alpha \beta \xi^2}{2\gamma_2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left(\alpha \beta \sqrt{\frac{\gamma_2}{\xi^2}} \left| \frac{\xi^2 + 1}{\xi^2}, \alpha, \beta \right. \right) d\gamma \quad (11)$$

根据文献[21]可得

$$F_\gamma(\gamma) = 1 - \frac{2(\alpha + \beta) A \sqrt{C}}{16\pi \sqrt{\gamma_1}} \sqrt{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_1}\right) G_{1,6}^{6,0} \left(\frac{(\alpha \beta)^2 C \gamma}{16 \gamma_1 \gamma_2} \left| \frac{\xi^2 + 1}{2}, \kappa_1 \right. \right) \quad (12)$$

其中， $A = \frac{\alpha \beta \xi^2}{2 \sqrt{\gamma_2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)}$ ， $\kappa_1 = \frac{\xi^2 - 1}{2}, \frac{\alpha - 1}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\beta - 1}{2}, \frac{\beta}{2}, -\frac{1}{2}$ 。

3 误码率分析

误码率是衡量系统性能最重要的指标。为了研究混合 RF-FSO 系统是否对深空通信有改善作用，本文在深空中将混合 RF-FSO 系统与传统的 FSO 系统进行了对比，通过误码率来判别系统性能优劣。

受到湍流介质影响的系统非条件误码率为

$$P_{BER} = \int_0^\infty P_e(\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (13)$$

其中, $P_e(\gamma)$ 为调制方式在高斯白噪声中的条件误码率, $f_\gamma(\gamma)$ 为具体信道的概率密度函数表达式。

3.1 采用 FSO 系统的误码率分析

本节将对在深空中采用 FSO 通信的信道进行模拟仿真, FSO 信道采用 Gamma-Gamma 分布。系统采用混合脉冲位置调制-二元相移键控-副载波强度调制 (LPPM-BPSK-SIM, L-ary pulse position modulation-binary phase shift keying-subcarrier intensity modulation), 该混合调制在高斯白噪声中的条件误码率^[25]为

$$P_{\text{LPPM-BPSK-SIM}} = Q\left(\frac{1}{4}\sqrt{\gamma L 1bL}\right) \quad (14)$$

其中, $L = 2^M$ 为信号的时隙数, 又被称作信号长度。将式(14)和式(7)代入式(13), 得到 LPPM-BPSK-SIM 在有湍流时的误码率表达式。本节的实验仿真中, 指向误差参数为 $\xi=1$, 载波频率为 8.4 GHz。

图 4 是深空中不同 SEP 下 FSO 系统采用 LPPM-BPSK-SIM 的误码率, $L=8$ 。由图 4 知, SEP 越大, 系统误码率越低。当 $\alpha=0.8^\circ$ 时, 太阳中心到通信路径的垂直距离为 $3R_{\text{sun}}$, 接收信噪比为 40 dB 时, 系统误码率仍大于 10^{-2} , 通信链路受到日冕太阳风的严重影响, 通信质量极差。当 $\alpha=1.4^\circ$ 、 1.7° 、 2.1° 、 2.5° 时, 对应的太阳中心到通信链路的径向距离分别为 $5.3R_{\text{sun}}$ 、 $6.4R_{\text{sun}}$ 、 $7.9R_{\text{sun}}$ 、 $9.4R_{\text{sun}}$, 这 4 种情况下的通信系统误码率很相近, 且远低于 $\alpha=0.8^\circ$ 时的误码率。这是因为太阳日冕区的分布并不是线性的, 越靠近太阳, 干扰越大, 这个结论与图 2 结论一致。当载波频率为 8.4 GHz 时, 太阳与通信路径的距离大于 $5R_{\text{sun}}$ 时有较好的通信效果。由此可知, 深空通信采用 FSO 通信系统时, 通信质量较差, 误码率较高, 因此, 3.2 节在深空通信中引入混合 RF-FSO 系统, 对比分析混合 RF-FSO 系统与 FSO 系统的误码率性能。

3.2 采用 RF-FSO 系统的误码率分析

为了改善深空通信质量, 本节研究了混合 RF-FSO 系统在深空中的通信质量, 并将其误码率与传统 FSO 系统进行比较。混合 RF-FSO 系统中, RF 信道服从瑞利分布, FSO 信道服从 Gamma-Gamma 分布。

此外, 为了在调制方式上进一步改善深空通信质量, 本文对比了 LPPM、BPSK 和 LPPM-BPSK-SIM 在深空中的误码率情况。由文献[26]知,

高斯白噪声中 LPPM 调制关于信噪比的误码率可以表示为

$$P_{\text{LPPM}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{\gamma\frac{L}{2}1bL}\right) \quad (15)$$

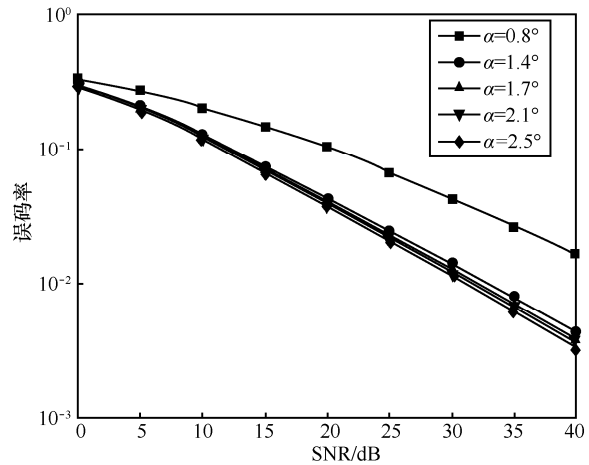


图 4 不同 SEP 时信噪比与误码率的关系

在针对混合 RF-FSO 系统误码率的研究中, BPSK 以其较好的抗干扰性经常被用到, 其条件误码率表达式为^[12]

$$P_e(e|\gamma) = \frac{\Gamma(p, q\gamma)}{2\Gamma(p)} \quad (16)$$

其中, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 为不完全伽马函数, $p=0.5$ 、 $q=1$ 为调制参数。LPPM-BPSK-SIM 的条件误码率为式(14), 将 3 种调制的条件误码率代入式(13), 可得深空影响下三者的非条件误码率。

本文在 MATLAB 软件中进行了仿真, 为了简便分析, 假设 RF 链路和 FSO 链路的平均信噪比相等, 即 $\overline{\gamma_1} = \overline{\gamma_2} = \overline{\gamma}$, 指向误差参数为 $\xi=1$ 。本文首先模拟了深空通信中 FSO 系统和 RF-FSO 系统的误码率, 调制方式为 LPPM-BPSK-SIM, $\angle\alpha=1.7^\circ$, 即通信链路到太阳中心距离为 $6.4R_{\text{sun}}$ 。从图 5 中可以看出, 在 L 一定的情况下, 当平均信噪比大于 5 dB 时, 混合 RF-FSO 系统误码率低于 FSO 系统, 随着系统平均信噪比的增大, RF-FSO 系统与 FSO 系统误码率差值越大, 混合系统改善效果越好。无论在 FSO 系统还是 RF-FSO 系统中, 信号长度 L 值越大, 系统误码率越低。由此得出, 深空通信中混合 RF-FSO 系统相对于传统的 FSO 系统来说, 确实有更好的误码率性能, 随着信噪比增大, 改善效果更好。

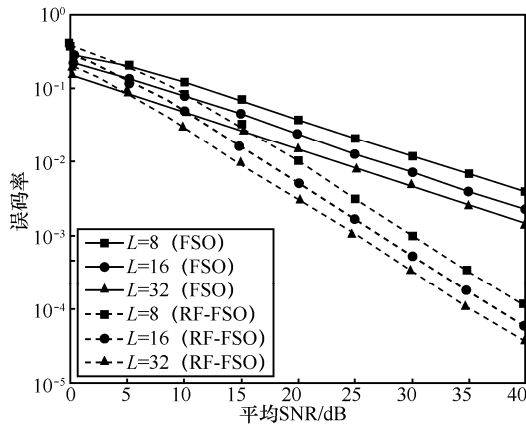


图 5 混合 RF-FSO 系统与 FSO 系统采用 LPPM-BPSK-SIM 的误码率

当太阳活跃程度不同时，本文继续展开 2 个系统的对比研究。图 6 为不同 SEP 下混合 RF-FSO 系统与 FSO 系统的误码率对比。从图 6 中可以看出，SEP 越大，误码率越低，这种现象在 2 种系统中都存在；SEP 一定时，平均信噪比大于 5 dB 时，混合 RF-FSO 系统的误码率均低于 FSO 系统误码率，随着混合系统平均信噪比的增大，混合 RF-FSO 系统与 FSO 系统误码率差值越来越大，因而得出结论，不同 SEP 下，混合 RF-FSO 系统依然有更好的误码率特性。

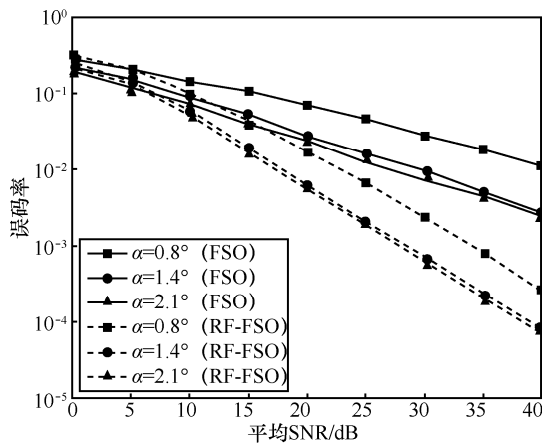


图 6 混合 RF-FSO 系统与 FSO 系统在不同 SEP 中的误码率

图 7 为深空中不同载波频率时采用混合 RF-FSO 系统的误码率，其中 $L=16$ ， $\alpha=1.4^\circ$ 。由图 7 可知，同种载波频率下，LPPM-BPSK-SIM 在深空通信中的误码率性能优于 BPSK。从载波上看，载波频率越大，系统误码率越小，但是从图 7 中可以看出，同种调制方式下，载波 8.4 GHz 与 2.4 GHz 的误码率差值远远大于载波 26.5 GHz 与 8.4 GHz 的差值。以上证明，虽然载波频率越高误码率越低，但

是若有其他通信限制，也可以在较高的频率范围内选择较合适的频率，其误码率性能不会有较大牺牲。

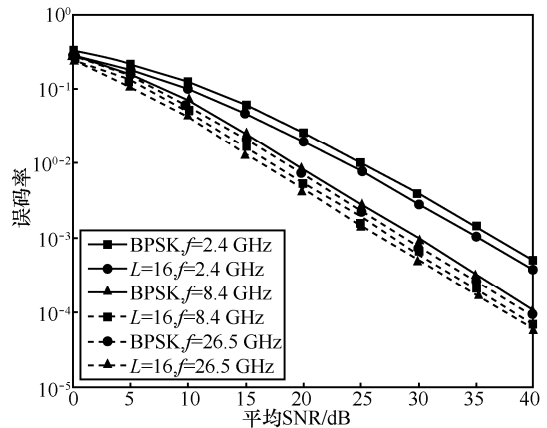


图 7 不同载波频率时混合 RF-FSO 系统误码率

为了在调制方式上进一步降低误码率，本文分别仿真了 3 种不同的调制方式。图 8 为 LPPM 和 BPSK 在深空通信中的误码率对比， $\alpha=1.7^\circ$ ，即太阳中心的到通信链路的径向距离为 $6.4R_{sun}$ ，载波频率为 8.4 GHz。从图 8 中可以看到，LPPM 的误码率随着 L 值的增大而降低，这是因为 L 越大，功率利用率越高，误码率越低。当 $L>4$ 时，LPPM 的误码率低于 BPSK 的误码率，此时采用 LPPM 能够获得比传统的 BPSK 更好的通信性能。

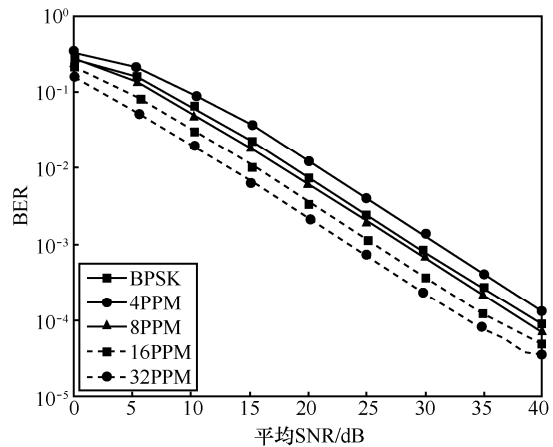


图 8 深空通信采用 LPPM 与 BPSK 的误码率

图 9 比较了混合 LPPM-BPSK-SIM 与 BPSK 在同样的外部条件下的误码率。由图 9 知，当 $L>8$ 时，混合调制的误码率性能优于 BPSK。综上所述，同样的外部条件下，LPPM 和 LPPM-BPSK-SIM 这 2 种调制方式优于 BPSK 的信号长度边界值不同，但都

存在随 L 值增大误码率减小的情况。因此可得,深空中采用混合 LPPM-BPSK-SIM 能够获得比传统 BPSK 更优的误码率性能,且 L 值越大,混合 LPPM-BPSK-SIM 误码率越低,因此可利用该混合调制进一步改善深空通信性能。

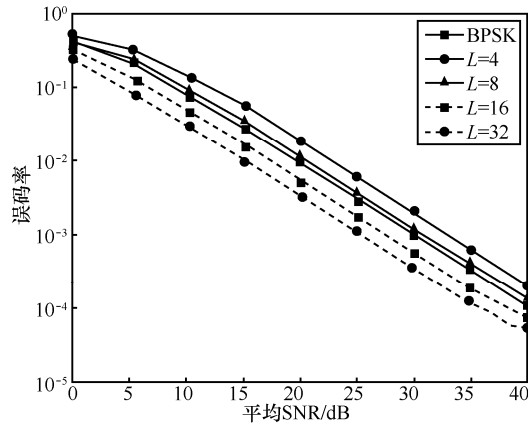


图 9 深空通信中 LPPM-BPSK-SIM 与 BPSK 的误码率

4 结束语

本文研究了深空通信的物理特性,在此基础上将混合 RF-FSO 系统应用于深空通信中,利用仿真对比了混合 RF-FSO 系统与传统的 FSO 系统的误码率。仿真结果显示,深空通信中混合 RF-FSO 系统误码率远低于 FSO 系统,即使载波频率不同、SEP 不同、调制方式不同时,该现象依然存在,因此混合 RF-FSO 系统可以用来改善深空通信性能。

此外,本文研究了 LPPM-BPSK-SIM 在深空通信中的误码率特性,并得出结论:深空通信中,选用 LPPM-BPSK-SIM 可以获得比传统的 BPSK 更低的误码率,且 L 值越大,误码率越小。因此,在深空中采用混合 LPPM-BPSK-SIM 和混合 RF-FSO 系统可以更有效地改善通信质量。

参考文献:

[1] MUHLEMAN D O, ESPOSITO P B, ANDERSON J D. The electron density profile of the outer corona and the interplanetary medium from Mariner-6 and Mariner-7 time-delay measurements[J]. *The Astrophysical Journal*, 1977, 211: 943-957.

[2] WOO R, ARMSTRONG J W, GAZIS P R. Doppler scintillation measurements of the heliospheric current sheet and coronal streamers close to the sun[J]. *Space Science Reviews*, 1995, 72(1): 223-228.

[3] 赵娜. 太阳闪烁及其对深空通信影响的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院空间科学与应用研究中心, 2009.

ZHAO N. Research on solar scintillation and its effects on deep space telecommunication[D]. Beijing: National Space Science Center, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009.

[4] 徐冠军, 宋朝晖. 弱太阳闪烁对深空电波传播影响的预测模型[J]. *电波科学学报*, 2017, 32(4): 377-384.

XU G J, SONG Z H. Weaken solar scintillation prediction model for EM wave propagation in deep space [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, 32(4): 377-384.

[5] XU G J. Error performance of deep space optical communication with M-ary pulse position modulation over coronal turbulence channels[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13344-13356.

[6] ATA Y, BAYKAL Y, Gökçe M C. Effect of strong atmospheric non-kolmogorov turbulence on the M-ary PSK subcarrier intensity modulated free space optical communications system performance[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(13): 3639-3645.

[7] XU G. BER and channel capacity of a deep space FSO communication system using L-PPM-MSK-SIM scheme during superior solar conjunction[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24610-24623.

[8] XU G, SONG Z. Effects of solar scintillation on deep space communications: challenges and prediction techniques[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 10-16.

[9] LEE E, PARK J, HAN D, et al. Performance analysis of the asymmetric dual-hop relay transmission with mixed RF/FSO links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1642-1644.

[10] 张韵, 王翔, 赵尚弘. 基于 2×2 放大转发中继的混合 RF/FSO 系统性能分析[J]. *激光与红外*, 2019, 49(4): 424-431.

ZHANG Y, WANG X, ZHAO S H. Performance of 2×2 AF relay-assisted RF/FSO communication system[J]. *Laser and Infrared*, 2019, 49(4): 424-431.

[11] 乔志, 石文孝, 王卓. 混合 RF/FSO 中继系统中断性能研究[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2018, 36(2): 121-125.

QIAO Z, SHI W X, WANG Z. Research on outage performance of mixed RF/FSO relay system[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2018, 36(2): 121-125.

[12] ANSARI I S, YILMAZ F, ALOUINI M S J I W C L. Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(10): 2654-2658.

[13] 刘强, 梅进杰, 姚云龙, 等. 深空信道模型特性分析及其仿真[J]. *空军雷达学院学报*, 2012, 26(3): 181-184.

LIU Q, MEI J J, YAO Y L, et al. Analysis of deep space channel model characteristics and its simulation[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2012, 26(3): 181-184.

[14] 徐冠军. 日冕区太阳风对深空电波传播影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

XU G J. Research on the impact of the coronal solar wind on deep space electromagnetic wave propagation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[15] MORABITO D D, SHAMBAYATI S, FINLEY S, et al. The cassini may 2000 solar conjunction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(2): 201-219.

[16] AFANASIEV N T J S P. Diagnostics of near-solar plasma turbulence parameters using the radio sounding technique at small heliocentric

- distances[J]. Solar Physics, 2007, 245(2): 355-367.
- [17] 王军, 党亚民, 薛树强. NeQuick 电离层模型在中国地区的应用[J]. 测绘科学, 2007(4): 38-40, 193.
WANG J, DANG Y M, XUE S Q. Application of NeQuick ionospheric model in China[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007(4): 38-40, 193.
- [18] MORABITO D. Solar corona amplitude scintillation modeling and comparison to measurements at X-band and Ka-band[R]. IPN Progress Report, (2003-05-15)[2020-08-04].
- [19] MANOHARAN P K. Evolution of near-sun solar wind turbulence[J]. arXiv Preprint, arXiv: 0904.2900, 2009.
- [20] HO C, SUE M, BEDROSSIAN A, et al. Scintillation effects on radio wave propagation through solar corona[C]//27th URSZ General Meeting. [S.n.:s.l.], 2002: 1-10.
- [21] 姚秀娟, 刘波, 杜艺颖, 等. 太阳闪烁影响下的星际通信链路参数设计[J]. 宇航学报, 2018, 39(10): 1167-1175.
YAO X J, LIU B, DU Y Y, et al. Interplanetary communication parameters design under influence of solar scintillation[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(10): 1167-1175.
- [22] 邵军虎, 刘晓楠, 孙莹. 外差检测下 FSO/RF 混合系统中断概率研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 137-143.
SHAO J H, LIU X N, SUN Y. Study on outage probability of FSO/RF hybrid system under heterodyne detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 137-143.
- [23] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[J]. Mathematics of Computation, 1966, 20(153): 310.
- [24] ALHABASH M A, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1562.
- [25] JIANG T, ZHAO L, LIU H, et al. Performance improvement for mixed RF-FSO communication system by adopting hybrid subcarrier

intensity modulation[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3724.

- [26] TAISSIR Y E. Performance comparison between OOK, PPM and PAM modulation schemes for free space optical (FSO) communication systems: analytical study[J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 79(11): 22-27.

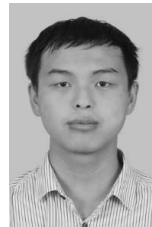
[作者简介]



刘宏展 (1975-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 华南师范大学教授、博士生导师, 主要研究方向为星地激光通信、精准测量、物联网技术等。



姜婷 (1994-), 女, 湖北随州人, 华南师范大学硕士生, 主要研究方向为自由空间光通信、深空通信等。



郝源 (1996-), 男, 广东广州人, 华南师范大学硕士生, 主要研究方向为深度学习在自由空间光通信中的应用。