

文章编号: 2095-4980(2015)05-0700-07

基于空间分集的太赫兹光子计数系统

辜开丽^{a,b}, 周小林^{a,b*}, 钟梓滢^{a,b}, 屠艳菊^a, 杜建洪^{a,b}

(复旦大学 a.电磁波信息科学教育部重点实验室; b.信息科学与工程学院 通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 由大气湍流引起的闪烁效应是影响太赫兹无线通信系统性能的重要因素, 为此提出了使用空间分集技术来改善受强大气湍流和噪声影响的太赫兹光子计数无线通信系统性能的方案, 并分别推导了在开关键控(OOK)调制下基于 Laguerre 模型采用发射分集、接收分集以及多输入多输出技术(MIMO)的系统在强大气湍流下的误码率表达式。数值分析结果表明, 在自由空间使用分集技术可以有效对抗强大气湍流, 降低通信系统的误码率, 是一种在不利天气条件下提升太赫兹无线通信性能的简单而有效的方法。

关键词: 太赫兹; 大气湍流; 空间分集; 光子计数; Laguerre 分布

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0700

Terahertz photon-counting systems based on spatial diversity

GU Kaili^{a,b}, ZHOU Xiaolin^{a,b*}, ZHONG Ziyang^{a,b}, TU Yanju^a, DU Jianhong^{a,b}

(a.Key Laboratory of EMW Information; b.Department of Communication Science & Engineering, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Scintillation induced by atmospheric turbulence is an important factor affecting the performance of terahertz wireless communication system. A space diversity scheme is proposed to improve the performance of terahertz photon-counting wireless communication system which is influenced by strong atmospheric turbulence and noise. The Bit Error Rate(BER) expression of transmit diversity system, receive diversity system and Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) system in strong turbulence channel are respectively derived. The numerical simulation results show that spatial diversity techniques which can be used to antagonize strong atmospheric turbulence effectively and reduce the BER of the communication system, is a simple and effective approach to improve terahertz wireless communication under adverse weather conditions.

Key words: Terahertz; atmospheric turbulence; spatial diversity; photon counting; Laguerre distribution

太赫兹无线通信技术、微波通信技术和自由空间光通信(Free Space Optical communication, FSO)技术是实现高速无线通信的3个重要技术, 由于太赫兹波的频段介于微波与光波之间, 太赫兹无线通信兼具微波通信和光波通信的特点, 但也有很多自身特点。与微波通信相比, 太赫兹无线通信具有传输容量大, 速率高, 保密性好, 抗干扰能力强以及天线、器件尺寸小等优点; 与自由空间光通信相比, 其能效更高, 具有很好的穿透沙尘烟雾的能力, 能够在恶劣环境下正常通信工作^[1-2]。在太赫兹无线通信系统中, 包含有用信息的太赫兹无线信号都是通过大气信道传输的, 由大气湍流引起的闪烁效应不可避免影响太赫兹无线通信系统性能, 限制太赫兹无线通信系统的应用^[3-4]。基于 FSO 研究中多输入多输出技术(MIMO)的应用启发, 将空间分集技术应用于太赫兹无线通信系统以用于克服强大气湍流对其通信系统性能的影响^[5]。

本文基于接收端光子计数 Laguerre 模型, 针对强大气湍流情况, 提出了采用发射分集(Multiple-Input Single-Output, MISO)、接收分集(Single-Input Multiple-Output, SIMO)以及 MIMO 的方案, 方案中发送端使用开关键控(On Off Keying, OOK), 接收端采用最大似然(Maximum-Likelihood, ML)检测准则。文中推导了相应方案在强湍

收稿日期: 2014-10-24; 修回日期: 2015-06-26

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(No.2012ZX03001013-004); 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室开放课题资助项目

*通信作者: 周小林 email:zhouxiaolin@fudan.edu.cn

流信道下误码率公式(BER),最后通过数值分析表明采用分集技术能够有效提升太赫兹无线通信系统性能。

1 强湍流下信道模型

太赫兹波在大气中传输时主要有 3 个效应:大气衰减效应、水吸收效应和大气湍流效应。为减小大气衰减效应和水吸收效应,可选取含有最小衰减的大气窗口^[3]。文献[4]推导出了太赫兹波段的大气折射率结构常数,并给出了太赫兹大气湍流信道模型即在强湍流情况下,信道可建模为 K 分布模型。在 K 分布模型中^[6],激光器到接收光圈的信道系数 I 概率密度函数为:

$$f_I(I) = \frac{2\alpha^{\frac{\alpha+1}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Omega^{\frac{\alpha+1}{2}}} I^{\frac{\alpha-1}{2}} K_{\alpha-1}\left(2\sqrt{\frac{\alpha I}{\Omega}}\right), I > 0 \quad (1)$$

式中: α 与闪烁指数 S.I. 二者的关系可表征为 $\alpha = \frac{2}{\text{S.I.}-1}$; $K_{\alpha}(\cdot)$ 是 α 阶第二类修正贝塞尔函数; Ω 为接收辐射强度均值,为归一化处理,令 $\Omega = E[I] = 1$ 。参数 S.I. 可以根据文献[4]直接由实际物理参数求得。

2 Laguerre 光子计数模型

在可见光和近红外区域,光子计数技术已经确认为用于检测微弱接收光信号不可或缺的方法。目前单光子计数在长波红外段、太赫兹段以及亚毫米波段已经通过采用量子阱半导体检测器得以实现^[7]。由于在太赫兹光子计数无线通信系统中的热噪声远大于自由空间光通信,接收端计数模型采用的是 Laguerre 光子计数模型^[8-10]。在单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO)系统 Laguerre 模型中,单位脉冲时间 τ 内发射符号为 d 时到达接收端的光子数 r 等于 n 的概率密度为:

$$P(r=n|d) = \text{Lag}(n, \lambda, N_0, D) = \frac{N_0^n}{(1+N_0)^{D+n+1}} \exp\left(-\frac{\lambda}{1+N_0}\right) L_n^D\left(-\frac{\lambda}{N_0(1+N_0)}\right) \quad (2)$$

式中: $N_0 = \frac{1}{\exp(hf/\psi T)-1}$ 为单时空模式内平均热噪声数, h 为普朗克常数, f 为太赫兹波频率, ψ 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度。在光波段, $N_0 \rightarrow 0$, Laguerre 模型可以近似用泊松模型来代替。而在太赫兹波段, N_0 较大,若取温度为 300 K,频率为 0.67 THz,则 N_0 为 8.84,所以在太赫兹波段热噪声对于系统影响不可忽略,用泊松计数模型对系统进行研究是不正确的; $D=2B\tau$ 为时间带宽积计数维数, $D+1$ 为在单位脉冲时间内单个空间模式内时间模式的数量, B 是接收端带限白高斯热噪声的带宽; L_n^D 为 n 阶拉盖尔多项式, $L_n^D(x) = \sum_{i=0}^n \binom{n+D}{n-i} \frac{(-x)^i}{i!}$; λ 是单位脉冲时间内接收到的信号加上背景辐射的光子数。当 $d=0$ 时接收端接收到的信号为 0,但此时存在背景辐射,其每个时隙的等效光子数可以表示为 $\lambda_0 = n_b$, $n_b = \eta E_b/hf$,其中 E_b 为每个时隙的背景辐射能量, η 为光电转换效率。当 $d=1$ 时,激光器发射激光,每个时隙到达光电检测装置(Photon Detector, PD)的平均信号光子数为 n_s , $n_s = \eta E_s/hf$,其中 E_s 为每个时隙平均接收信号的能量,则 $\lambda_1 = n_s Id + n_b$, I 为接收辐射强度。

3 MISO 方案

3.1 MISO 系统框图

MISO 的系统框图见图 1,左边是 MISO 发射端,有 M 个太赫兹激光器,右边是接收机,只有 1 个接收光圈。在 MISO 系统中,同一发送时刻, M 个激光器发送相同的符号,各激光器发射的光束经过相互独立路径到达接收端,接收端孔径对光束进行聚拢,并将聚拢后的光束通过太赫兹滤波器,滤除带外噪声,再通过 PD 输出为每个时隙接收到的光电子数,最后通过判决器输出数据。其中接收端接收到的光子数是 M 路信号光子数、背景噪声以及接收端的热噪声等效的光子数的叠加。

3.2 MISO 系统误码率

本方案中发射端采用开关键控 OOK 调制,发送符号 $d \in \{0,1\}$, $d=1$ 表示发射端激光器发射太赫兹脉冲, $d=0$ 表示发射端激光器不发射脉冲。若信源比特率用符号 R 表示,那么在 OOK 调制下单脉冲的时间宽度为 $\tau=1/R$ 。

令发送端每个符号的发送功率保持不变, 则每个激光器每时隙发送的功率降为 SISO 情况下的 $1/M$, 以便与 SISO 系统性能进行公平比较。

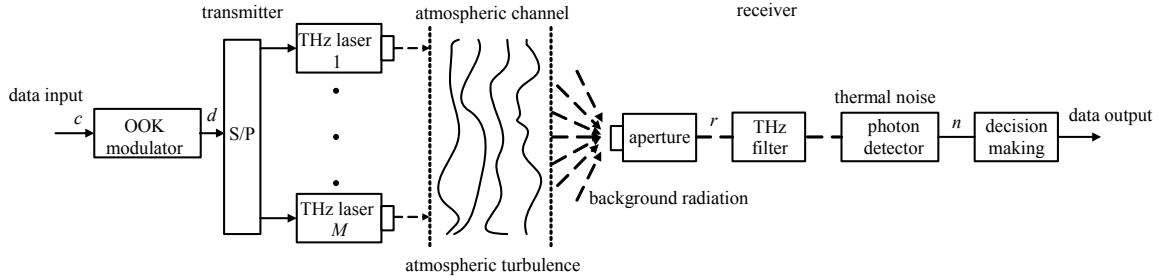


Fig.1 System block diagram of MISO
图 1 MISO 系统框图

若已知信道模型, 当发送符号 $d=0$ 时, 接收到光子数为 n 的概率密度为^[11]:

$$P(n|d=0) = \text{Lag}[n, n_b, N_0, (D+1)M-1] = \frac{N_0^n}{(1+N_0)^{(D+1)M+n}} e^{-\frac{n_b}{1+N_0}} L_n^{(D+1)M-1} \left[-\frac{n_b}{N_0(1+N_0)} \right] \quad (3)$$

当发送符号 $d=1$ 时, 接收到的信号包含来自 M 条支路信号的叠加, 则 n 的概率密度函数表示为:

$$P(n|d=1) = \int_I \text{Lag} \left[n, \frac{n_s}{M} I + n_b, N_0, (D+1)M-1 \right] p_I(I) dI \quad (4)$$

式中 $I = \sum_{m=1}^M I_m$, $p_I(I)$ 是 I 的概率密度函数。

在强湍流信道下, 根据文献[4], 信道采用 K 分布建模, 假设发射分集情况下各衰落信道为独立同分布, 即 $I_m, m=1, 2, \dots, M$, 都服从参数为 α 的 K 分布, 且相互独立。因为 K 分布与 Gamma-Gamma 分布相比, 相当于 Gamma-Gamma 分布中的参数选择为 $\alpha>0, \beta=1$, 所以对于 M 个服从 K 分布的独立随机变量的和分布可等效为一个参数经过修正的 Gamma-Gamma 分布, 具体为^[12]:

$$p_I(I) = \frac{2(\alpha'\beta')^{(\alpha'+\beta')/2}}{\Gamma(\alpha')\Gamma(\beta')(\Omega')^{(\alpha'+\beta')/2}} I^{\frac{\alpha'+\beta'}{2}-1} K_{\alpha'-\beta'} \left(2\sqrt{\frac{\alpha'\beta'I}{\Omega'}} \right) \quad (5)$$

式中: $\alpha' = M\alpha + \varepsilon$, $\varepsilon(M, \alpha, 1) = (M-1) \frac{-0.1328 - 0.95\alpha}{1.98 + 0.00124\alpha}$; $\beta' = M$; $\Omega' = M$ 。

根据文献[13]中第二类修正贝塞尔函数与 Meijer-G 函数的关系, 可将式(5)写成 Meijer-G 函数的形式, 即:

$$p_I(I) = \frac{(\alpha'\beta')}{\Gamma(\alpha')\Gamma(\beta')\Omega'} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{\alpha'\beta'I}{\Omega'} \middle| \begin{matrix} - \\ \alpha'-1 \quad \beta'-1 \end{matrix} \right) \quad (6)$$

再根据 Meijer-G 函数的积分性质:

$$\int_0^\infty x^{-\rho} e^{-\beta x} G_{pq}^{mn} \left(\alpha x \middle| \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right) dx = \beta^{\rho-1} G_{p+1,q}^{m,n+1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \middle| \begin{matrix} \rho, a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right) \quad (7)$$

式中 $G_{p,q}^{m,n} \left(\alpha x \middle| \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right)$ 为 Meijer-G 函数表达式^[13], 进一步可将式(4)去掉积分化简写成式(8)形式:

$$P(n|d=1) = \int_I \text{Lag} \left[n, \frac{n_s}{M} I + n_b, N_0, (D+1)M-1 \right] \frac{(\alpha'\beta')}{\Gamma(\alpha')\Gamma(\beta')\Omega'} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{\alpha'\beta'I}{\Omega'} \middle| \begin{matrix} - \\ \alpha'-1 \quad \beta'-1 \end{matrix} \right) dI =$$

$$\frac{MN_0^n (\alpha'\beta') e^{-\frac{n_b}{1+N_0}}}{n_s (1+N_0)^{(D+1)M+n-1} \Gamma(\alpha')\Gamma(\beta')\Omega'} \sum_{i=0}^n \binom{n+(D+1)M-1}{n-i} \frac{1}{i! N_0^i} \sum_{t=0}^i \binom{i}{t} \left(\frac{n_b}{1+N_0} \right)^{i-t} G_{1,2}^{2,1} \left[\frac{\alpha'\beta' M (1+N_0)}{n_s} \middle| \begin{matrix} -t \\ \alpha'-1 \quad \beta'-1 \end{matrix} \right] \quad (8)$$

在接收端判决器采用 ML 准则, 其判决输出 $\hat{d}$, 判决准则为:

$$\frac{P(n|d=1)}{P(n|d=0)} \stackrel{\hat{d}=1}{>} 1 \quad (9)$$

所以最优判决门限 μ 为 $P(n|d=1)/P(n|d=0) > 1$ 成立的 n 的最小整数值。假设发送“1”和“0”是等概率的,则在 OOK 调制方案下基于 Laguerre 计数模型的 MISO 系统的误码率为^[9]:

$$BER = P(c=0)P(\hat{c}=1|c=0) + P(c=1)P(\hat{c}=0|c=1) = \frac{1}{2} [P(\hat{c}=1|c=0) + P(\hat{c}=0|c=1)] = \frac{1}{2} \left[\sum_{n=\mu+1}^{\infty} P(n|d=0) + \sum_{n=0}^{\mu} P(n|d=1) \right] \quad (10)$$

4 SIMO 系统方案

4.1 SIMO 系统框图

采用接收分集 SIMO 的太赫兹光子计数无线通信系统框图见图 2, 其中 d 为发送符号, r 为孔径接收器接收的光信号, n 为经过光电探测器检测出的光子数, c 为比特输入。图中发送端只有 1 个太赫兹激光器, 接收端有 N 个相互独立的接收光圈。该方案中, 接收端采用等增益合并(Equal Gain Combining, EGC), 对由每个孔径接收的信号乘以增益系数 $1/N$, 便于在接收孔径面积相等的情况下比较 SIMO 方案与 SISO 方案性能。最后将 N 条支路接收到的光子数叠加送入 PD 检测。接收端采用 OOK 调制, 在每个发送时隙, 当发送符号为 1 时, 每个光圈接收到的有用信号平均光子数为 $n_s \cdot I_n$, I_n 为激光器与第 n 个光圈之间信道系数。发送符号为 0 时, 接收到信号的光子数为 0。

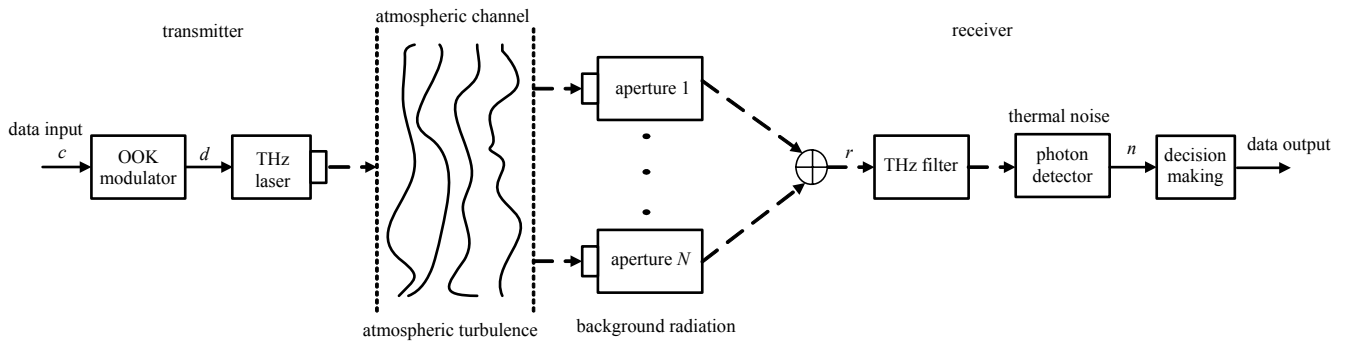


Fig.2 System block diagram of SIMO
图 2 SIMO 系统框图

4.2 SIMO 系统误码率

若已知信道模型, 当发送符号 $d=0$ 时, 接收到光子数为 n 的概率密度为^[11]:

$$P(n|d=0) = \text{Lag}(n, n_b, N \times N_0, D) = \frac{(N \times N_0)^n}{[1 + (N \times N_0)]^{D+1+n}} e^{-\frac{n_b}{1 + (N \times N_0)}} L_n^D \left[-\frac{n_b}{(N \times N_0)(1 + (N \times N_0))} \right] \quad (11)$$

当发送符号 $d=1$ 时, 接收到的信号包含来自 N 条支路信号乘以系数 $1/N$ 的叠加, 则 n 的概率密度函数为:

$$P(n|d=1) = \int_I \text{Lag}(n, n_s I + n_b, N \times N_0, D) p_I(I) dI \quad (12)$$

式中 $I = \sum_{n=1}^N I_n$, $p_I(I)$ 是 I 的概率密度函数。

与 MISO 的假设一样, 在强湍流 K 信道模型下各衰落信道为独立同分布。则对于 N 个服从 K 分布的独立随机变量的和分布可等效为一个参数经过修正的 Gamma-Gamma 分布, 表达形式与式(5)相同, 只是需将相应参数 M 用 N 替换。

式(12)去掉积分号, 用 Meijer-G 函数表示, 见式(13)。

将式(11)和式(13)代入式(10)即可得到采用 OOK 调制的 SIMO 的系统误码率。

$$P(n|d=1) = \frac{N(N \times N_0)^n (\alpha' \beta') e^{-\frac{n_b}{1 + N \times N_0}}}{n_s (1 + N \times N_0)^{D+n} \Gamma(\alpha') \Gamma(\beta') \Omega'} \sum_{i=0}^n \binom{n+D}{n-i} \times \frac{1}{i! (N \times N_0)^i} \sum_{t=0}^i \binom{i}{t} \left(\frac{n_b}{1 + N \times N_0} \right)^{i-t} G_{1,2}^{2,1} \left[\frac{\alpha' \beta' N (1 + N \times N_0)}{\Omega' n_s} \middle| \begin{matrix} -t \\ \alpha'-1, \beta'-1 \end{matrix} \right] \quad (13)$$

5 MIMO 系统方案

5.1 MIMO 系统框图

MIMO 系统框图见图 3, 发送端有 M 个太赫兹激光器, 接收端有 N 个独立的接收光圈, 在接收端仍使用 EGC 方案。同样为公平比较 SISO 与 MIMO 方案, 发送端发射功率乘以系数 $1/M$, 接收端平均接收到的光子数乘以系数 $1/N$, 以使发送总功率和接收孔径总面积和 SISO 等效。

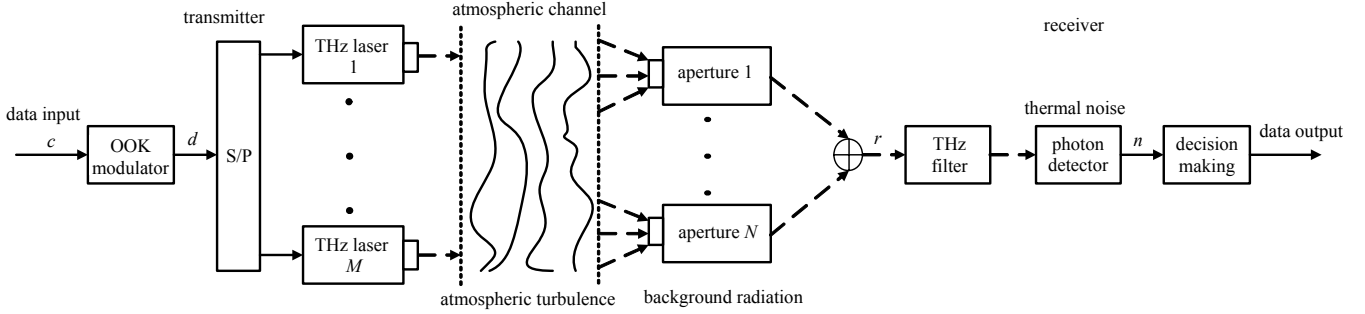


Fig.3 System block diagram of MIMO
图 3 MIMO 系统框图

5.2 MIMO 系统误码率

同样发送端采用 OOK 调制, 接收端使用 ML 准则, 在 MIMO 情况下, 已知信道用 K 分布建模, 当发射端发送信号 0 时, 接收到光子数为 n 的概率密度为^[11]:

$$P(n|d=0) = \text{Lag}[n, n_b, N \times N_0, (D+1)M-1] = \frac{(N \times N_0)^n}{[1 + (N \times N_0)]^{(D+1)M+n}} e^{-\frac{n_b}{1+(N \times N_0)}} L_n^{(D+1)M-1} \left[-\frac{n_b}{(N \times N_0)(1+(N \times N_0))} \right] \quad (14)$$

当发送符号 1 时, 接收到的信号包含来自 N 条支路信号乘以系数 $1/N$ 的叠加, 则 n 的概率密度函数表示为:

$$P(n|d=1) = \int_I \text{Lag} \left[n, \frac{n_s}{MN} I + n_b, N \times N_0, (D+1)M-1 \right] p_I(I) dI \quad (15)$$

式中 $I = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{mn}$, $p_I(I)$ 是 I 的概率密度函数。

同样对于 $M \times N$ 个服从 K 分布的独立随机变量的和分布可等效为 1 个参数经过修正的 Gamma-Gamma 分布, 表达形式与式(5)相同, 也只是需将相应参数 M 改为 $M \times N$ 即可。

式(15)去掉积分号, 用 Meijer-G 函数表示, 见式(16):

$$P(n|d=1) = \frac{MN(N \times N_0)^n (\alpha' \beta') e^{-\frac{n_b}{1+N \times N_0}}}{n_s (1+N \times N_0)^{(D+1)M+n} \Gamma(\alpha') \Gamma(\beta') \Omega'} \sum_{i=0}^n \binom{n+(D+1)M-1}{n-i} \times \frac{1}{i!(N \times N_0)^i} \sum_{t=0}^i \binom{i}{t} \left(\frac{n_b}{1+N \times N_0} \right)^{i-t} G_{1,2}^{2,1} \left[\frac{\alpha' \beta' MN(1+N \times N_0)}{\Omega' n_s} \middle| \begin{matrix} -t \\ \alpha'-1, \beta'-1 \end{matrix} \right] \quad (16)$$

将式(14)和式(16)代入式(10)即可得到采用 OOK 调制的 MIMO 的系统误码率。

6 数值仿真分析

数值分析选择大气窗口的中心频率为 0.67 THz, 以减小大气衰减对太赫兹无线通信系统性能的影响, 数值仿真工具选用 mathematica, 其他具体相关参数见表 1, 根据文献[4]中给出大气折射率结构参数公式, 在 0.67 THz 频率下, 当传输距离大于 1 291 m 时, 系统处于强大气湍流情况下, 这里将传输距离设为 1 750 m, 得到闪烁指数为 1.160 8, K 分布参数 α 为 12.434 3。此处带宽与单位脉冲时间宽度的乘积取为 4, 背景噪声设为 -195 dBJ。

表 1 数值仿真参数表

symbol	quantity	value
f	optical frequency	0.67 THz
T	temperature	300 K
α	K parameter	12.434 3
E_b	background radiation energy	-195 dBJ
D	time-bandwidth product	4
η	quantum efficiency	1

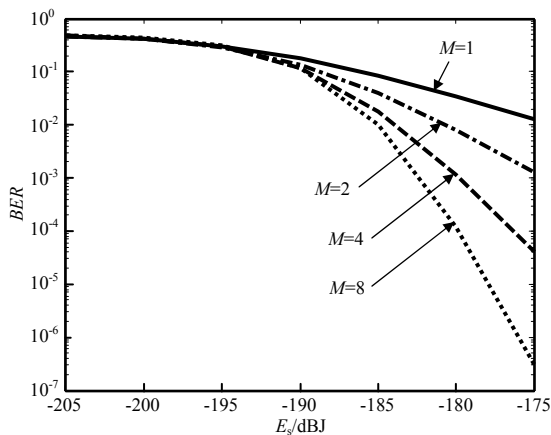


Fig.4 BER performance of MISO under K channel
图4 K信道OOK调制发射分集性能

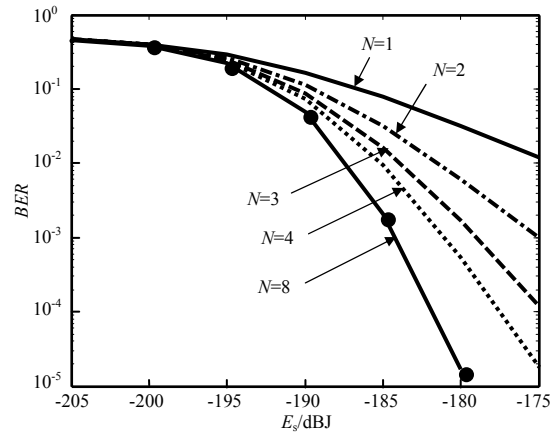


Fig.5 BER performance of SIMO under K channel
图5 K信道OOK调制接收分集性能

图4为MISO系统在强湍流情况下不同发射端激光器数量 M 取值下的误码率性能。从图中可以看出,MISO系统比SISO系统的性能要优越很多,且 M 越大性能提升效果越明显。

图5为SIMO系统在强湍流情况下不同接收端光圈数量 N 取值下的误码率性能。从图中可以看出,SIMO系统性能比SISO系统提升了很多,且 N 越大性能提升效果越明显。

图6为在强湍流信道条件下MIMO系统在不同 M 和 N 值下的误码率性能。仿真结果表明,采用MIMO系统比SISO系统要优越很多,同时相比于图4和图5中的MISO和SIMO系统,性能提高更快,如当单位脉冲时间内信息能量 $E_s = -180$ dB时, $M=4, N=4$ 的MIMO系统较 $M=4, N=1$ 的MISO和 $M=1, N=4$ 的SIMO系统误码率降低近2个数量级。从图6分析可知, M 和 N 取值为4时已达到较满意的性能。

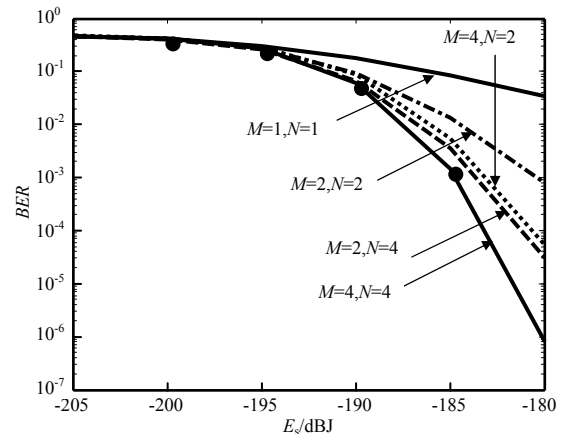


Fig.6 BER Performance of MIMO under K channel
图6 K信道下OOK调制MIMO系统性能

7 结论

本文提出将空间分集技术用于太赫兹光子计数无线通信系统中,并分别推导了强湍流信道条件下采用OOK调制的MISO、SIMO以及MIMO系统的误码率。在太赫兹光子计数系统中,接收端的计数模型采用的是Laguerre计数模型,因在太赫兹波段,接收端的热噪声是不可忽略的。通过数值分析表明,使用分集技术可以有效对抗强大气湍流以及热噪声对太赫兹无线通信系统性能的影响,降低通信系统的误码率,是一种在不利天气条件下提升太赫兹无线通信性能的简单而有效的方法。

参考文献:

- [1] 林长星,张健,邵贝贝. 高速无线通信技术研究综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(4):383-389. (LIN Changxin, ZHANG Jian, SHAO Beibei. Survey of research on high speed wireless communication technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):383-389.)
- [2] 张健,邓贤进,王成,等. 太赫兹高速无线通信:体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):1-13. (ZHANG Jian, DENG Xianjin, WANG Cheng, et al. Terahertz high speed wireless communications: systems, techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):1-13.)
- [3] 崔海霞,姚建铨,钟凯,等. 太赫兹波大气传输特性研究[J]. 红外与激光工程, 2009,38(z):237-240. (CUI Haixia, YAO Jianquan, ZHONG Kai, et al. The study on atmosphere propagation feature of THz wave[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(z):237-240.)
- [4] BAO Lianwei, ZHAO Hengkai, ZHENG Guoxin, et al. The influence of turbulence scintillation on the BER of THz wireless communication[C]// International Conference on Information Technology and Software Engineering. Beijing, China: LNEE, 2013:167-174.

- [5] Navidpour S M, Uysa M, Kavehrad M. BER performance of Free-Space Optical transmission with spatial diversity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8):2813-2819.
- [6] NIU Mingbo, CHENG Julian, Jonathan F Holzman. Diversity reception for coherent Free-Space Optical communications over K-distributed atmospheric turbulence channels[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Sydney, Australia:IEEE, 2010:1-6.
- [7] Susumu Komiyama. Single-photon detection in THz and its application[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, USA:IEEE, 2010:CMF3.
- [8] Sherman Karp, John R Clark. Photon counting: a problem in classical noise theory[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1970, 16(6):672-680.
- [9] Helstrom C W. Performance of an ideal quantum receiver of a coherent signal of random phase[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1969, 5(3):562-564.
- [10] Robert M Gagliardi. Photon counting and Laguerre detection[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(1):208-211.
- [11] Mohsen Razavi, Jeffrey H Shapiro. Wireless optical communications via diversity reception and optical preamplification[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(3):975-983.
- [12] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series and Products[M]. New York:Academic Press, 2000.
- [13] Nestor D Chatzidiamantis, George K Karagiannidis, Diomidis S Michalopoulos. On the distribution of the sum of gamma-Gamma variates and application in MIMO optical wireless systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(5):1298-1308.

作者简介:



辜开丽(1989-), 女, 安徽省滁州市人, 在读硕士研究生, 研究方向为太赫兹无线通信.email:gkl_fdc@163.com.

周小林(1973-), 男, 上海市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹无线通信.email:zhouxiaolin@fudan.edu.cn.

钟梓滢(1992-), 女, 广州市人, 本科生, 主要研究方向为无线通信.

屠艳菊(1988-), 女, 上海市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信.

杜建洪(1960-), 男, 上海市人, 博士, 副教授, 主要研究方向无线通信.

(上接第 690 页)

作者简介:



冯进军(1966-), 男, 山西省运城市人, 研究员, 从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS技术、太赫兹真空电子学等研究.email:fengjj@ieee.org.

杜英华(1978-), 女, 济南市人, 硕士, 高级工程师, 从事W波段行波管和太赫兹真空电子器件的研究.

唐 焱(1983-), 女, 长春市人, 硕士, 工程师, 从事太赫兹真空辐射源研究.

蔡 军(1978-), 男, 河北省唐山市人, 博士, 高级工程师, 从事W波段行波管和太赫兹真空电子器件研制工作.

李莉莉(1979-), 女, 河北省邯郸市人, 博士, 工程师, 从事微波/光学级MPCVD金刚石材料的人工合成及其在微波器件中的应用研究.

胡银富(1982-), 男, 安徽省旌德县人, 硕士, 高级工程师, 从事太赫兹电真空器件、MEMS工艺等相关研究.

潘 攀(1986-), 男, 北京市人, 硕士, 从事亚毫米波及太赫兹真空电子器件研制.

李含雁(1976-), 女, 浙江省嵊州市人, 博士, 高级工程师, 从事MEMS微加工技术研究.