

基于 SSC-SC 方案的移动无线传感器网络系统的性能分析

徐凌伟¹, 张 浩^{1,2}, 吕婷婷¹, 施 威³, T. A. Gulliver²

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 维多利亚大学 电子与计算机工程学院, 加拿大 维多利亚 V8W 3P6; 3. 青岛科技大学 信息科学与技术学院, 山东 青岛 266061)

摘 要: 在 N -Nakagami 信道下, 研究了结合切换驻留合并(SSC)与选择合并(SC)的移动无线传感器网络系统的平均符号误码率(ASEP)和中断概率(OP)性能. 基于矩生成函数(MGF)的方法, 推导了系统采用相移键控调制(PSK)、正交幅度调制(QAM)、脉冲幅度调制(PAM)等的 ASEP 的精确表达式; 同时, 也推导出了系统中断概率(OP)的精确闭合表达式, 然后对不同系统条件下的性能做了数值仿真, 验证了理论分析结果的正确性. 仿真结果表明: 随着分集支路数、衰弱系数的增加, 衰弱因子的减小, 系统的 ASEP 和 OP 性能得到了很好的改善.

关键词: 移动无线传感器网络; 切换驻留合并; 选择合并; N -Nakagami 信道; 平均符号误码率; 中断概率
中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.03.021

0 引言

近年来, 无线传感器网络已经被广泛应用于军事、交通、商业等领域中^[1]. 由于传感器节点具有体积小、功耗低等特点, 在传感器节点上安装多根发射或者接收天线在物理上不容易实现. 为了解决上述矛盾, 一种方案就是组成虚拟多输入多输出(MIMO)系统^[2]进行合作传输^[3]. 在 MIMO 无线通信中, 广泛使用多天线分集接收技术来减小多径衰弱的影响. 在最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)、等增益合并(Equal Gain Combining, EGC)和选择合并(Selection Combining, SC) 3 种典型的多天线分集合并技术中, MRC 性能最好, 但是实现最复杂; SC 性能相对差些, 但是实现比较简单^[4].

针对上述技术缺陷, 很多学者开始研究切换合并(Switched Diversity Combining, SDC)技术, 其主要包括切换驻留合并(Switch-and-Stay Combining, SSC)和切换检测合并(Switch-and-Examine Combining, SEC)^[5-6]. SDC 技术在实际应用中易于实现, 但这是以系统性能为代价的. 为了在实现复杂度与系统性能之间找到平衡点, 文献[7]提

出了 SSC-SC 混合合并技术, 将 SSC 与 SC 结合, 使系统硬件结构大大简化, 同时仍能取得较好的性能.

Kovacs 等^[8]通过实验测量和理论分析, 建立了适合室内和城镇微小区的移动-移动通信环境下的双瑞利(2-Rayleigh)分布模型. 在双瑞利衰落模型的基础上, 大量试验研究指出^[9]: 当两个移动终端在相互通信时, 通过其附近的散射体产生了 $N(N > 2)$ 个相互独立的 Nakagami 衰落过程时, 那么信道的幅度传播特性将服从 N -Nakagami 分布. 文献[10]研究了 N -Nakagami 分布的概率密度函数和累积分布函数, 推导了不同调制方式误码率的精确闭合表达式. N -Nakagami 分布在车联网中移动的车与车之间的通信、协作分集系统中移动终端之间的通信、无线传感器网络中移动节点之间的通信等方面得到了广泛的应用.

SSC-SC 混合合并技术的硬件结构简单, 但仍有较好的性能, 将其应用到移动无线传感器网络系统, 可以降低网络传输所需能耗、延长网络生存周期, 具有很好的应用价值. 在 N -Nakagami 信道下, 系统采用 SSC-SC 方案, 基于矩生成函数(Moment Generating Function, MGF)的方法, 推导

收稿日期:2015-02-02; 修订日期:2015-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61304222); 山东省自然科学基金项目(ZR2012FQ021); 山东省高等学校科技计划项目(J12LN88); 青岛市国际科技合作项目(12-1-4-137-hz).

作者简介:徐凌伟(1987-), 男, 山东高密人, 中国海洋大学博士研究生, 主要从事 MIMO 无线通信、无线传感器网络研究, Email:gaomilaojia2009@163.com.

出了涵盖多种调制方式的平均误码率 (Average Symbol Error Probability, ASEP) 的计算公式;同时也得到了中断概率 (Outage Probability, OP) 的精确表达式. 最后,对不同系统条件下的性能做了数值仿真和分析,验证了分析结果的正确性.

1 系统模型

采用文献[11]中的基于簇的多跳虚拟 MIMO 通信系统模型,如图 1 所示. 图 1 显示了两个簇之间的通信过程,信息可以通过多个簇的传递到达目的节点. 在这里,每个节点都是移动的,每个源节点和协作节点只有一根天线,每个 sink 节点有多根天线,移动节点间的每条信道是相互独立的.

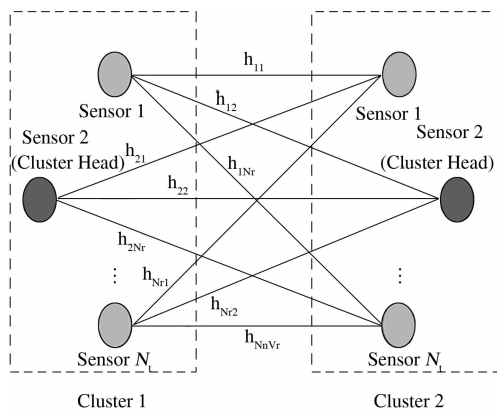


图 1 虚拟 MIMO 系统的模型

Fig. 1 The virtual MIMO system model

由文献[10]知,服从 N -Nakagami 分布的随机变量 Z 可表示为 N 个独立变量 a_i 的乘积,即

$$Z = \prod_{i=1}^N a_i. \quad (1)$$

式中: N 是衰弱因子; a_i 服从 Nakagami 分布,其概率密度函数为

$$f_a(r) = \frac{2m_i}{\Omega_i \Gamma(m_i)} r^{2m_i-1} \exp\left(-\frac{m_i}{\Omega_i} r^2\right). \quad (2)$$

其中, m_i 表示衰弱系数, $\Omega_i = E(|a_i|^2)$, $E()$ 表示求均值.

Z 服从 N -Nakagami 分布,其概率密度函数为^[10]

$$f_Z(z) = \frac{2}{z \prod_{i=1}^N \Gamma(m_i)} G_{0,N}^{N,0} \left[z^2 \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_N \end{matrix} \right]. \quad (3)$$

$$G_{p,q}^{m,n} [z | \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix}] =$$

$$\frac{1}{j2\pi} \int_F \frac{\prod_{i=1}^m \Gamma(b_i + s) \prod_{i=1}^n \Gamma(1 - a_i - s)}{\prod_{i=1}^p \Gamma(a_i + s) \prod_{i=1}^q \Gamma(1 - b_i - s)} z^{-s} ds. \quad (4)$$

假设发射端有 1 个移动传感器节点,接收端有 $2L$ 个移动传感器节点,则构成了一个 $1 \times 2L$ 的虚拟 MIMO 系统. 在这里,假设各分集支路衰落幅度平衡,各支路具有相同的均值,单个支路的接收信号为

$$y = Zx + w. \quad (5)$$

式中: Z 为衰落特性相互独立的信道传输系数,服从 N -Nakagami 分布; x 表示发送的有用信号,它在一个符号间隔内的平均能量为 E_s ; w 为加性复高斯噪声,其单边功率谱密度为 N_0 .

由式(5)得单个支路的瞬时接收信噪比为

$$r = |Z|^2 \frac{E_s}{N_0}. \quad (6)$$

其平均接收信噪比为

$$\bar{r} = E(|Z|^2) \frac{E_s}{N_0}. \quad (7)$$

其概率密度函数可以表示为^[10]

$$f_r(r) = \frac{1}{r \prod_{i=1}^N \Gamma(m_i)} G_{0,N}^{N,0} \left[\frac{r}{\bar{r}} \prod_{i=1}^N m_i \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_N \end{matrix} \right]. \quad (8)$$

累积分布函数可以表示为^[10]

$$F_r(r) = \frac{1}{\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i)} G_{1,N+1}^{N,1} \left[\frac{r}{\bar{r}} \prod_{i=1}^N m_i \middle| \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix} \right]. \quad (9)$$

虚拟 MIMO 系统首先对每 2 路进行 SSC 合并接收,再对得到的 L 路信号进行 SC 合并接收. 每 2 个单支路进行 SSC 合并接收时,总的输出瞬时信噪比 r_{SSC} 的累积分布函数为^[6]

$$F_{SSC}(r) = \begin{cases} F_r(r_{th}) F_r(r), & 0 < r < r_{th}; \\ [1 + F_r(r_{th})] F_r(r) - F_r(r_{th}), & r \geq r_{th}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: r_{th} 为预先设置的切换门限.

对式(10)进行求导,可以得到 r_{SSC} 的概率密度函数为^[6]

$$f_{SSC}(r) = \begin{cases} F_r(r_{th}) f_r(r), & 0 < r < r_{th}; \\ [1 + F_r(r_{th})] f_r(r), & r \geq r_{th}. \end{cases} \quad (11)$$

当 L 路信号采用选择合并时,总的输出瞬时信噪比 r_{SC} 为^[12]

$$r_{SC} = \max(r_1, r_2, \dots, r_L). \quad (12)$$

所以,SSC-SC 接收端信噪比的累积分布函数为^[7]

$$F_{SSC-SC}(r) = (F_{SSC}(r))^L = \begin{cases} (F_r(r_{th}) F_r(r))^L, & 0 < r < r_{th}; \\ ([1 + F_r(r_{th})] F_r(r) - F_r(r_{th}))^L, & r \geq r_{th} \end{cases} \quad (13)$$

SSC-SC 接收端信噪比的概率密度函数为^[7]

$$f_{\text{SSC-SC}}(r) = \begin{cases} L(F_r(r_{\text{th}})F_r(r))^{L-1}F_r(r_{\text{th}})f_r(r) \\ L([1+F_r(r_{\text{th}})]F_r(r)-F_r(r_{\text{th}}))^{L-1}[1+F_r(r_{\text{th}})]f_r(r), r \geq r_{\text{th}} \\ L(F_r(r_{\text{th}}))^L(F_r(r))^{L-1}f_r(r), 0 < r < r_{\text{th}}; \\ = \begin{cases} L \sum_{k=0}^{L-1} \binom{L-1}{k} [1+F_r(r_{\text{th}})]^{k+1} (-F_r(r_{\text{th}}))^{L-1-k} (F_r(r))^k f_r(r), r \geq r_{\text{th}}. \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

SSC-SC 接收端信噪比的 MGF 为

$$Q_{\text{SSC-SC}}(s) = \int_0^\infty e^{-sr} f_{\text{SSC-SC}}(r) dr = I_1 + I_2. \quad (15)$$

$$I_1 = \frac{e^{-sr_{\text{th}}}}{\left(\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i)\right)^{2L}} \left(G_{1,N+1}^{\text{N},1} \left[\frac{r_{\text{th}}}{r} \prod_{i=1}^N m_i \mid \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix}\right]\right)^{2L} + \frac{s}{\left(\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i)\right)^{2L}} \left(G_{1,N+1}^{\text{N},1} \left[\frac{r_{\text{th}}}{r} \prod_{i=1}^N m_i \mid \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix}\right]\right)^L \cdot \int_0^{r_{\text{th}}} e^{-sr} \left(G_{1,N+1}^{\text{N},1} \left[\frac{r}{r_{\text{th}}} \prod_{i=1}^N m_i \mid \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix}\right]\right)^L dr. \quad (16)$$

$$I_2 = L \sum_{k=0}^{L-1} \binom{L-1}{k} \left(1 + \frac{1}{\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i)} G_{1,N+1}^{\text{N},1} \left[\frac{r_{\text{th}}}{r} \prod_{i=1}^N m_i \mid \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix}\right]\right)^{k+1} \cdot \frac{1}{\left(\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i)\right)^L} \left(-G_{1,N+1}^{\text{N},1} \left[\frac{r_{\text{th}}}{r} \prod_{i=1}^N m_i \mid \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix}\right]\right)^{L-1-k} \frac{1}{k+1} \cdot \left(s \int_{r_{\text{th}}}^\infty e^{-sr} \left(G_{1,N+1}^{\text{N},1} \left[\frac{r}{r_{\text{th}}} \prod_{i=1}^N m_i \mid \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix}\right]\right)^{k+1} dr - e^{-sr_{\text{th}}} \left(G_{1,N+1}^{\text{N},1} \left[\frac{r_{\text{th}}}{r} \prod_{i=1}^N m_i \mid \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_N, 0 \end{matrix}\right]\right)^{k+1}\right). \quad (17)$$

2 平均误码率分析

根据文献[13]的结论,一个衰落信道下涵盖多种调制方式包括 M 进制 PSK、QAM 和 PAM 调制等,相干解调时 ASEP 的通用公式为

$$P_{\text{sep}} = \sum_{d=1}^D E_d \int_0^{\theta_d} Q_{\text{SSC-SC}}\left(\frac{\varphi_d}{V_d - 2\Lambda_d \sin^2 \theta}\right) d\theta. \quad (18)$$

2.1 M-PSK 调制

采用相干检测的 M -PSK 调制时,系统的 ASEP 可以表示为

$$P_{\text{sep}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} Q_{\text{SSC-SC}}\left(\frac{\sin^2(\pi/M)}{\sin^2 \theta}\right) d\theta. \quad (19)$$

2.2 M-QAM 调制

采用相干检测的 M -QAM 调制时,系统的 ASEP 可以表示为

$$P_{\text{sep}} = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\pi \sqrt{M}} \int_0^{\pi/2} Q_{\text{SSC-SC}}\left(\frac{3}{2(M-1) \sin^2 \theta}\right) d\theta -$$

$$\frac{4(\sqrt{M}-1)^2}{\pi M} \int_0^{\pi/4} Q_{\text{SSC-SC}}\left(\frac{3}{2(M-1) \sin^2 \theta}\right) d\theta. \quad (20)$$

2.3 M-PAM 调制

采用相干检测的 M -PAM 调制时,系统的 ASEP 可以表示为

$$P_{\text{sep}} = \frac{2(M-1)}{\pi M} \int_0^{\pi/2} Q_{\text{SSC-SC}}\left(\frac{3}{(M^2-1) \sin^2 \theta}\right) d\theta. \quad (21)$$

3 中断概率分析

中断概率定义为系统的接收信噪比低于某一门限值的概率.对于 SSC-SC 系统而言,由累积分布函数的定义可知其中断概率为^[12]

$$P_{\text{out}} = Pr[0 \leq r \leq r_T] = \int_0^{r_T} f_{\text{SSC-SC}}(r) dr = \begin{cases} (F_r(r_{\text{th}})F_r(r_T))^L, 0 < r_T < r_{\text{th}}; \\ ([1+F_r(r_{\text{th}})]F_r(r_T)-F_r(r_{\text{th}}))^L, r_T \geq r_{\text{th}}. \end{cases} \quad (22)$$

式中, r_T 表示某一门限值.

4 数值仿真

预先设置的切换门限 r_{th} 为 5 dB, 给定的门限值 r_T 为 2 dB. 图 2 为移动无线传感器网络系统在双 Nakagami 信道下, 系统的 OP 性能随分集支路数变化的曲线, 分集支路数 $2L=2, 4, 6, 8$. 由图 2 可知, 随着分集支路数的增加, 移动无线传感器网络系统的 OP 性能是不断改善的, 例如, 当 SNR = 12 dB, 分集支路数 $2L=2$ 的 OP 是 1×10^{-2} ; 分集

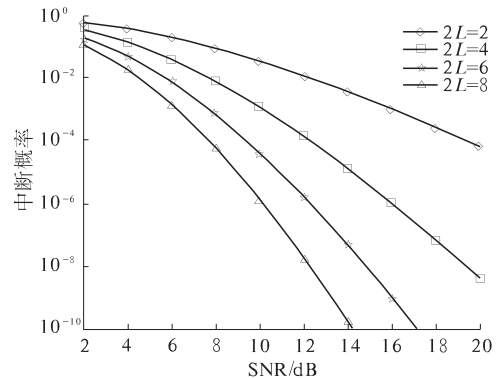


图 2 双 Nakagami 信道分集支路数对系统 OP 性能的影响

Fig. 2 The impact of the diversity branches on the OP performance

支路数 $2L=4$ 的 OP 是 1×10^{-4} ;分集支路数 $2L=6$ 的 OP 是 2×10^{-6} ;分集支路数 $2L=8$ 的 OP 是 2×10^{-8} .

图 3 为移动无线传感器网络系统在双 Nakagami 信道下,系统的 OP 性能随衰弱系数变化的曲线,其中,衰弱系数 $m=1,2,3$,分集支路数 $2L=4$. 由图 3 可知,随着衰弱系数的增加,移动无线传感器网络系统的 OP 性能是不断改善的,例如,当 $\text{SNR}=12\text{ dB}$, $m=1$ 的 OP 是 1×10^{-2} ; $m=2$ 的 OP 是 1×10^{-4} ; $m=3$ 的 OP 是 9×10^{-7} .

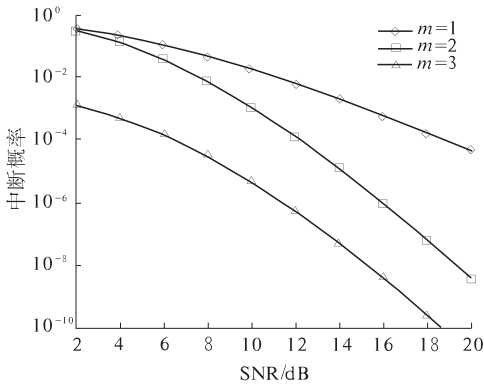


图 3 双 Nakagami 信道下衰弱系数对系统 OP 性能的影响

Fig.3 The impact of the fading coffeicent on the OP performance

图 4 给出了移动无线传感器网络系统在 N -Nakagami 信道下,系统的 OP 性能随衰弱因子变化的曲线,衰弱因子 $N=2,3,4$,衰弱系数 $m=2$,分集支路数 $2L=4$. 由图 4 可知,随着衰弱因子的增加,信道的衰弱程度不断增大,移动无线传感器网络系统的 OP 性能是不断减弱的,例如,当 $\text{SNR}=12\text{ dB}$, $N=2$ 的 OP 是 1×10^{-4} ; $N=3$ 的 OP 是 1×10^{-3} ; $N=4$ 的 OP 是 5×10^{-3} .

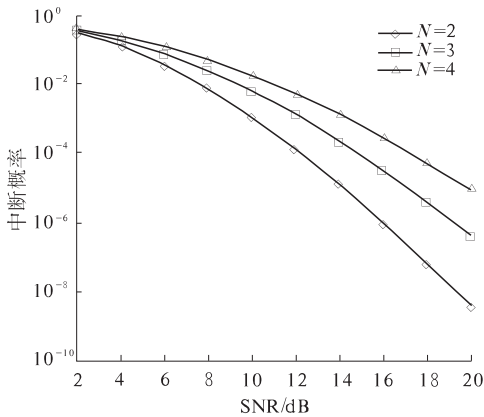


图 4 N -Nakagami 信道下衰弱因子对系统 OP 性能的影响

Fig.4 The impact of the fading coffeicent on the OP performance

图 5 分析比较了 SSC, SSC-SC, SC 在双 Nakagami 信道下的 OP 性能,分集支路数 $2L$ 分别为 4,6,衰弱因子 $N=2$,衰弱系数 $m=2$. 由图 5 可知,3 种传输方式中,SSC 的 OP 性能比 SSC-SC, SC 都要差.随着 $2L$ 的增大,SSC-SC 与 SC 两种合并方式的 OP 性能越来越接近.在误码率为 10^{-6} 时,SSC-2SC 与 4SC 所需的平均信噪比相差 3.8 dB; SSC-3SC 与 6SC 所需的平均信噪比相差 2 dB. SSC-SC 的硬件结构比 SC 简单,更利于在实际中应用.

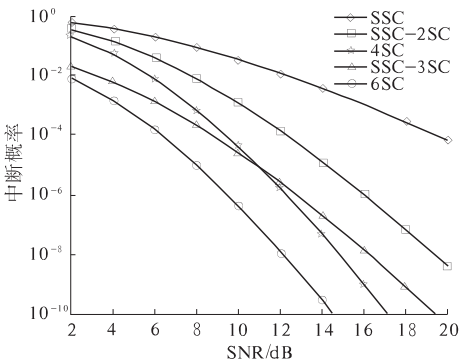


图 5 SSC, SSC-SC, SC 在双 Nakagami 信道下的 OP 性能的比较

Fig.5 The OP comparison of SSC, SSC-SC, SC

5 结论

基于 MGF 的方法推导了系统在 N -Nakagami 衰落信道上采用 PSK、QAM、PAM 等几种调制方式的 ASEP 的精确表达式;同时,也得到了 OP 的精确闭合表达式,然后对不同条件下的系统性能做了数值仿真. 仿真结果表明:随着分集支路数、衰弱系数的增加,衰弱因子的减小,系统的 ASEP 和 OP 性能得到了很好的改善. 本文中的信道是相互独立的,在实际环境中,信道并不是完全独立的,在后续研究中,可以进一步研究相关信道对系统性能的影响.

参考文献:

[1] 陆亚芳,易可夫,冯摇绪,等. 基于模糊理论的无线传感器网络多层分簇式路由算法[J]. 传感技术学报,2014,27(7):933-938.

[2] FANG Zhao-xi, YUAN Xiao-jun, WANG Xin. Towards the asymptotic sum capacity of the MIMO cellular two-way relay channel [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(6): 4039-4051.

[3] QU Q, MILSTELN L, VAMAN D. Cooperative and constrained MIMO communications in wireless ad hoc/ sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless

- Communications, 2010, 9(10): 3120–3129.
- [4] SHANKAR P M. Performance analysis of diversity combining algorithms in shadowed fading channels [J]. Wireless Personal Communications, 2006, 37(1–2): 61–72.
- [5] YANG H C, ALOUINI M S. Performance analysis of multibranch switched diversity systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(5): 782–794.
- [6] XIAO L, DONG X. New results on the BER of switched diversity combining over nakagami fading channels [J]. IEEE Communication Letters, 2005, 9(2): 136–138.
- [7] 郭冬梅, 张曙. 切换驻留合并与选择合并相结合的混合合并技术 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(4): 1133–1138.
- [8] KOVACS I Z. Radio channel characterization for private mobile radio systems: mobile-to-mobile radio link investigation [D]. Kongeriget Danmark: Aalborg University, Department of Electrical and Computer Engineering, 2002.
- [9] SALO J, EL SALLABI H M, VAINIKAINEN P. Statistical analysis of the multiple scattering radio channel [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(11): 3114–3124.
- [10] GEORGE K K, NIKOS C S, P T M. N * Nakagami: A novel stochastic model for cascaded fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(8): 1453–1458.
- [11] AKYILDIZ I F, SU W, CAYIRCI E, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38: 393–422.
- [12] SIMON M K, ALOUINI M S. Digital communication over fading channels [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Press, 2005.
- [13] YILMAZ F, KUCUR O. Exact performance of wireless multihop transmission for M -ary coherent modulations over generalized gamma fading channels [C] // Proceedings of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Cannes: IEEE Press, 2008: 1–5.

Performance Analysis of Mobile Wireless Sensor Network System Based on SSC-SC Scheme

XU Ling-wei¹, ZHANG Hao^{1,2}, LV Ting-ting¹, SHI Wei³, T. A. GULLIVER²

(1. Department of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Victoria, Victoria V8W 3P6, Canada; 3. Department of Information Science and Technology, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: On the basis of N -Nakagami fading channels, the average symbol error probability (ASEP) and outage probability (OP) of mobile wireless sensor network system employing switch-and-stay combining (SSC) and selection combining (SC) are investigated in this paper. Based on the moment generating function (MGF) approach, the exact ASEP expressions are derived for several modulation schemes, including phase shift keying (PSK), quadrature amplitude modulation (QAM), and pulse amplitude modulation (PAM). The exact closed-form OP expressions are also presented. Then the ASEP and OP performance under different conditions is evaluated through numerical simulations, and the accuracy of the analytical results is verified. The simulation results showed that: the ASEP and OP performance is improved with the diversity branches and the fading coefficient increased, while the fading factor decreased.

Key words: mobile wireless sensor network; switch-and-stay combining; selection combining; N -Nakagami fading channel; outage probability