

带有相位噪声的 MPSK 和 MDPSK 性能统一分析

程云鹏, 王金龙, 沈 良, 任国春
(解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007)

摘 要: 本文研究了相位噪声场对 MPSK、MDPSK 性能的影响. 首先在统一框架下, 推导了 AWGN、Nakagami m 衰落和莱斯衰落信道中带有相位噪声时 MPSK 相干解调和 MDPSK 差分解调的误符号率; 然后运用计算机仿真和数值方法, 对误符号率和相位噪声的关系进行了验证; 最后通过应用示例, 展示了本文工作在系统设计和性能评估中的重要作用.

关键词: MPSK; MDPSK; 性能分析; 相位噪声

中图分类号: TN914 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 04-0706-04

A Unified Performance Analysis of MPSK and MDPSK with Phase Noise

CHENG Yun peng, WANG Jin long, SHEN Liang, REN Guo chun
(Institute of Communications Engineering, PLAUST, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: The effects of phase noise on the performances of MPSK and MDPSK are investigated in this paper. Firstly, under a unified framework, the symbol error rates (SERs) of MPSK coherent and MDPSK differential demodulation with phase noise are derived in AWGN, Nakagami m fading and Rician fading channels. Secondly, the relationships between SERs and phase noise are validated by using computer simulation and numerical method. Finally, the importance of our work for system design and performance evaluation is demonstrated by an application instance.

Key words: M-ary phase shift keying; M-ary differential phase shift keying; performance analysis; phase noise

1 引言

在数字通信领域中, MPSK 和 MDPSK 调制有着广泛的应用, 相干解调和差分解调作为两种基本解调方式, 在各种应用条件下的性能分析也一度成为人们的研究重点^[1]. 尽管如此, 但很难有统一的分析方法来表达 MPSK、MDPSK 的误符号率, 直到文献[2]中关于高斯噪声扰动下两个矢量夹角分布的开拓性工作, 才使统一框架的建立成为可能, 这也是后来许多研究工作的基础.

文献[3, 4]建立了各种衰落信道下误符号率的统一分析模型. 文献[5]研究了莱斯(Rician)衰落信道下的 MPSK、MDPSK 误符号率; 文献[2]作者也继续做了深入的研究工作, 给出了 MDPSK 误符号率的全新表达式^[6], 并对夹角分布的公式和定理进行了重新表述和拓展^[7]. 但这些研究工作并没有完全考虑实际环境中的诸多负面因素. 如果载波频率和相位恢复不理想, MPSK、MDPSK 解调符号上就会引入相位误差, 该误差可通称为相位噪声, 对系统性能产生重要影响.

关于相位噪声对 MPSK、MDPSK 的影响分析, 文献[8]运用几何方法推导了 AWGN 信道中 MPSK 的条件误符号率; 若考虑相位噪声的分布特性, 文献[9, 10]给出了 BPSK 误比特率

的上下界和逼近表达式, 文献[11]推导了 DPSK 的误比特率上界. 特别地, 文献[12]得到了慢衰落信道中 BPSK、QPSK 平均误符号率的简化表达式. 从上述工作可以看出: 在相位噪声条件下, MPSK、MDPSK 的性能分析仍缺乏统一的思路和方法, 特别是 MDPSK 的分析并没有过多涉及, 这对于实际系统设计和性能评估是不够的.

在上述背景下, 本文研究了多种信道条件下相位噪声对 MPSK、MDPSK 性能的影响, 在统一框架下, 推导了 MPSK、MDPSK 的误符号率公式. 第二节为信号模型, 第三节为相位噪声下 MPSK、MDPSK 的误符号率分析; 第四节为数值结果和讨论; 最后部分为结论.

2 信号模型

假定 MPSK、MDPSK 系统接收端符号定时准确, 则最佳抽样时刻的符号可统一表示为:

$$z_n = \sqrt{\gamma_s} e^{j\theta_n} d_n + w_n \quad (1)$$

其中, γ_s 为符号信噪比, θ_n 表示相干相位, w_n 表示零均值单位方差且相互独立的复高斯随机变量. $d_n = \exp\{j\phi_n\}$ 为发送符号, $\phi_n \in \{2\pi m/M; m = 0, 1, \dots, M-1\}$ 为符号相位. 对于 MPSK 调制, ϕ_n 表示输入比特的调制相位, d_n 为调制符号; 对于 MDPSK

调制, 调制相位为 $\Delta\phi_n = \arg [d_n d_{n-1}^*] = \arg [\Delta d_n]$, $\arg[\bullet] \in [0, 2\pi)$ 表示主值相位, Δd_n 为调制符号。

MPSK 采用相干解调方式, 需要估计相干相位 θ_n , 若估计结果记为 $\hat{\theta}_n$, 则解调符号可表示为:

$$d_n = e^{-j\hat{\theta}_n} z_n = \sqrt{Y_s} e^{-j(\hat{\theta}_n - \theta_n)} d_n + w_n e^{-j\hat{\theta}_n} \\ = \sqrt{Y_s} e^{-j\Delta\theta} d_n + w'_n \quad (2)$$

其中, $\Delta\theta = \hat{\theta}_n - \theta_n$ 为相位噪声, 通常来源于载波相位跟踪误差(如锁相环)或者频率偏差, w'_n 表示与 w_n 同分布的复高斯随机变量。

MDPSK 采用差分解调方式, 解调符号可表示为:

$$\Delta d_n = z_n z_{n-1}^* = Y_s e^{-j(\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_{n-1})} d_n d_{n-1}^* + f(w_n, w_{n-1}) \\ = Y_s e^{-j\Delta\theta} d_n d_{n-1}^* + f(w_n, w_{n-1}) \quad (3)$$

其中, $\Delta\theta = \hat{\theta}_n - \hat{\theta}_{n-1}$ 为相位噪声, 通常由载波频率偏差所引起, $f(w_n, w_{n-1})$ 为 w_n 和 w_{n-1} 的函数。

若令 $\arg[\bullet]_0^{M-1}$ 表示对主值相位进行 M 相判决, 即 $\arg[\bullet]_0^{M-1} \in \{2\pi m/M; m = 0, 1, \dots, M-1\}$, 则 MPSK、MDPSK 调制相位的判决结果可表示为:

$$\phi_n = \arg[d_n]_0^{M-1} \quad \Delta\phi_n = \arg[\Delta d_n]_0^{M-1} \quad (4)$$

3 性能分析

3.1 AWGN 信道中的误符号率

MPSK、MDPSK 调制

时, 调制符号 $(\Delta) d_n$ 的星座图由均匀分布在单位圆上的 M 点构成, 如图 1 所示, $(\Delta) d_n$ 的正确判决区域为 $[(\Delta) \phi_n - \pi/M, (\Delta) \phi_n + \pi/M]$ 。由式(2)、(3)可知, 相位噪声 $(\Delta) \theta$ 的影响可等效于调制符号 $(\Delta) d_n$ 的相位 $(\Delta) \phi_n$ 顺时针转动 $(\Delta) \theta$, 变为 $(\Delta) \phi_n - (\Delta) \theta$, 我们不妨称为等效相位。而在解调符号 $(\Delta) d_n$ 判决时, 仍按照调制时的判决区域 $[(\Delta) \phi_n - \pi/M, (\Delta) \phi_n + \pi/M]$ 进行。

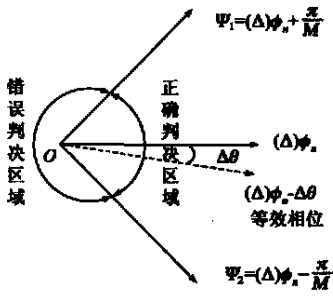


图 1 符号判决区域示意图

设解调符号 d_n 、 $(\Delta) d_n$ 的相位可表示为:

$$\phi = (\Delta) \phi_n - \Delta\theta + \phi \quad (5)$$

其中, ϕ 表示高斯噪声引起的相位偏差, 定义:

$$\phi_1 = (\Delta) \phi_n + \pi/M \quad (6)$$

$$\phi_2 = (\Delta) \phi_n - \pi/M \quad (7)$$

则 MPSK、MDPSK 解调时的符号错误概率为:

$$P_S^{AWGN} = P\{\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2\} \\ = P\{\pi/M + \Delta\theta \leq \phi \leq -(\pi/M - \Delta\theta)\} \quad (8)$$

值得说明的是: 当 $|\Delta\theta| \leq \pi/M$ 时, 等效相位 $(\Delta) \phi_n - \Delta\theta$ 仍位于调制时的正确判决区域内; 相反地, $|\Delta\theta| \geq \pi/M$ 时, 等效相位则落在错误判决区域内, 必然会出现高概率的符号判决错误。对于这两种情况, 式(8)均可统一表示, 后续推导的各误符号率公式也同样适用。因而, 相位噪声 $\Delta\theta$ 的取值范围为 $\Delta\theta$

$\in [-\pi, \pi)$ 。

根据文献[7, 式(3)], 式(8)可表示为:

$$P_S^{AWGN} = F[-(\pi/M - \Delta\theta)] - F[\pi/M + \Delta\theta] \quad (9)$$

其中, $F(\phi)$ 表示受高斯噪声扰动的两个矢量间夹角的分布, 具体地说, 文献[7]中式(24)在 $A = -\phi$ 和 $\rho = Y_s$ 时对应于 MPSK 解调, 即为:

$$F(\phi) = -\frac{\operatorname{sgn}(\phi)}{2\pi} \int_0^{\pi-|\phi|} \exp\left\{-\frac{Y_s \sin^2\phi}{\sin^2\theta}\right\} d\theta \quad (10)$$

文献[7]中式(12b)对应于 MDPSK 解调:

$$F(\phi) = -\frac{\operatorname{sgn}(\phi)}{2\pi} \int_0^{\pi-|\phi|} \exp\left\{-\frac{Y_s \sin^2\phi}{1 + \cos\phi \sin^2\theta}\right\} d\theta \quad (11)$$

因此, MPSK、MDPSK 的误符号率分别为:

$$P_{S, MPSK}^{AWGN}(\Delta\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-|\Delta\theta|} \exp\left\{-\frac{Y_s \sin^2(\pi/M - \Delta\theta)}{\sin^2\phi}\right\} d\phi \\ + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-|\Delta\theta|} \exp\left\{-\frac{Y_s \sin^2(\pi/M + \Delta\theta)}{\sin^2\phi}\right\} d\phi \quad (12)$$

$$P_{S, MDPSK}^{AWGN}(\Delta\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-|\Delta\theta|} \exp\left\{-\frac{Y_s \sin^2(\pi/M - \Delta\theta)}{1 + \cos(\pi/M - \Delta\theta) \cos\phi}\right\} d\phi \\ + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-|\Delta\theta|} \exp\left\{-\frac{Y_s \sin^2(\pi/M + \Delta\theta)}{1 + \cos(\pi/M + \Delta\theta) \cos\phi}\right\} d\phi \quad (13)$$

特例: 若 $M = 2$, BPSK、BDPSK 的误比特率公式为:

$$P_{b, BPSK}^{AWGN}(\Delta\theta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left\{-\frac{Y_s \cos^2(\Delta\theta)}{\sin^2\phi}\right\} d\phi \\ = Q(\sqrt{2Y_s \cos\Delta\theta}) \quad (14)$$

$$P_{b, BDPSK}^{AWGN}(\Delta\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \exp\left\{-\frac{Y_s \cos^2(\Delta\theta)}{1 + \sin(\Delta\theta) \cos\phi}\right\} d\phi \quad (15)$$

其中, $Q(\bullet)$ 表示高斯 Q 函数, 表达式为[6, 式(1)]:

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sin^2\phi}\right\} d\phi \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt \quad x \geq 0 \quad (16)$$

若 $\Delta\theta = 0$, 则 $P_{b, BPSK}^{AWGN} = Q(\sqrt{2Y_s})$, $P_{b, BDPSK}^{AWGN} = e^{-Y_s/2}$, 这就是常见的 AWGN 信道中 BPSK 和 BDPSK 的误比特率公式^[1]。

3.2 Nakagami m 衰落信道中的误符号率

在实际通信环境中, 无线信道呈现衰落特性, 不同的通信环境, 就可能有不同的信道衰落特性, 因此, 衰落信道模型也就多种多样, 如蜂窝无线系统常采用瑞利(Rayleigh)衰落模型, 室内无绳电话系统常采用莱斯衰落模型, 而 Nakagami m 衰落模型可更精确地描述蜂窝系统^[4]。信道衰落特性可划分为频率选择性和频率非选择性(平坦)、快衰落和慢衰落。本文考虑平坦慢衰落特性, 即单径慢衰落信道, 这为利用 AWGN 信道中的误符号率公式提供了便利条件。信道衰落特性使得接收端符号信噪比发生变化, 若瞬时符号信噪比仍记为 Y_s , 其概率密度函数为 $p(Y_s)$, 则衰落信道中的误符号率为:

$$P_S^{Fading} = \int_0^{\infty} P_S^{AWGN}(Y_s) p(Y_s) dY_s \quad (17)$$

Nakagami m 衰落信道中 Y_s 的概率密度函数为^[1]:

$$p(\gamma_s) = \frac{\gamma_s^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}_s} \right)^m e^{-m\gamma_s/\bar{\gamma}_s}, \quad \gamma_s \geq 0 \quad (18)$$

其中, m 为衰落指数, $m \geq 1/2$, $\Gamma(\cdot)$ 表示 gamma 函数, $\Gamma(m) = \int_0^\infty e^{-t} t^{m-1} dt$. 将式(12)、(18)和式(13)、(18)分别代入式(17), 通过计算, Nakagami- m 衰落信道中 MPSK、MDPSK 的误符号率为:

$$P_{S, MPSK}^{Nakagami-m}(\Delta\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-\pi/M+\Delta\theta} \left[\frac{m \sin^2 \phi}{m \sin^2 \phi + \bar{\gamma}_s \sin^2(\pi/M - \Delta\theta)} \right]^m d\phi + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-\pi/M-\Delta\theta} \left[\frac{m \sin^2 \phi}{m \sin^2 \phi + \bar{\gamma}_s \sin^2(\pi/M + \Delta\theta)} \right]^m d\phi \quad (19)$$

$$P_{S, MDPSK}^{Nakagami-m}(\Delta\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-\pi/M+\Delta\theta} \left[\frac{m(1 + \cos(\pi/M - \Delta\theta) \cos \phi)}{m(1 + \cos(\pi/M - \Delta\theta) \cos \phi) + \bar{\gamma}_s \sin^2(\pi/M - \Delta\theta)} \right]^m d\phi + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-\pi/M-\Delta\theta} \left[\frac{m(1 + \cos(\pi/M + \Delta\theta) \cos \phi)}{m(1 + \cos(\pi/M + \Delta\theta) \cos \phi) + \bar{\gamma}_s \sin^2(\pi/M + \Delta\theta)} \right]^m d\phi \quad (20)$$

当 $m=1$ 时, 式(19)、(20)即为瑞利衰落信道中的误符号率公式. 此时, 若 $M=2$, 则:

$$P_{b, BPSK}^{Rayleigh}(\Delta\theta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2 \phi}{\sin^2 \phi + \bar{\gamma}_s \cos^2 \Delta\theta} d\phi \quad (21)$$

利用文献[4, 式(34)]:

$$\int_0^\pi \frac{1}{u + v \cos \phi} d\phi = \frac{\pi}{\sqrt{u^2 - v^2}}, \quad u \geq |v| \quad (22)$$

计算可得, BPSK 的误比特率为:

$$P_{b, BPSK}^{Rayleigh}(\Delta\theta) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\sqrt{\bar{\gamma}_s \cos^2 \Delta\theta}}{\sqrt{1 + \bar{\gamma}_s \cos^2 \Delta\theta}} \right] \quad (23)$$

同理, BDP SK 的误比特率计算为:

$$P_{b, BDP SK}^{Rayleigh}(\Delta\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{1 + \sin(\Delta\theta) \cos \phi}{1 + \sin(\Delta\theta) \cos \phi + \bar{\gamma}_s \cos^2(\Delta\theta)} d\phi = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\bar{\gamma}_s \cos(\Delta\theta)}{\sqrt{1 + 2\bar{\gamma}_s + \bar{\gamma}_s^2 \cos^2(\Delta\theta)}} \right] \quad (24)$$

若 $\Delta\theta=0$, 则 $P_{b, BPSK}^{Rayleigh} = [1 - \sqrt{\bar{\gamma}_s}/(1 + \bar{\gamma}_s)]/2$, $P_{b, BDP SK}^{Rayleigh} = [1 - \bar{\gamma}_s/(1 + \bar{\gamma}_s)]/2$. 这就是常见的瑞利衰落信道中 BPSK 和 BDP SK 的误比特率公式^[1].

3.3 莱斯衰落信道中的误符号率

莱斯衰落信道中 γ_s 的概率密度函数为^[3]:

$$p(\gamma_s) = \frac{1+K}{\bar{\gamma}_s} \exp\left[-\frac{(1+K)\gamma_s + K\bar{\gamma}_s}{\bar{\gamma}_s}\right] \cdot I_0\left(2\sqrt{\frac{K(1+K)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}}\right) \quad (25)$$

其中, K 为莱斯衰落参数, $K=0$ 即为瑞利衰落模型, $I_0(\cdot)$ 为零阶修正贝塞尔函数, $I_0(x) = \int_{-\pi}^\pi e^{-x \sin \phi} d\phi / 2\pi$. 将式(12)、(25)和(13)、(25)分别代入式(17), 并利用公式^[5]:

$$\int_0^\infty e^{-\alpha x} I_0\left(2\sqrt{\beta x}\right) dx = \frac{1}{\alpha} \exp\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \quad (26)$$

计算可得, 莱斯衰落信道中 MPSK、MDPSK 的误符号率为:

$$P_{S, M(D)PSK}^{Rayleigh}(\Delta\theta) =$$

$$\frac{1+K}{2\pi \cdot \bar{\gamma}_s} \int_0^{\pi-\pi/M+\Delta\theta} \exp\left[-\frac{K(1+K)}{\bar{\gamma}_s \Omega_{M(D)PSK}(\Delta\theta)} - K\right] d\phi + \frac{1+K}{2\pi \cdot \bar{\gamma}_s} \int_0^{\pi-\pi/M-\Delta\theta} \exp\left[-\frac{K(1+K)}{\bar{\gamma}_s \Omega_{M(D)PSK}(-\Delta\theta)} - K\right] d\phi \quad (27)$$

其中

$$\Omega_{MPSK}(\Delta\theta) = \frac{(1+K) \sin^2 \phi + \bar{\gamma}_s \sin^2(\pi/M - \Delta\theta)}{\bar{\gamma}_s \sin^2 \phi} \quad (28)$$

$$\Omega_{MDPSK}(\Delta\theta)$$

$$= \frac{(1+K)(1 + \cos(\pi/M - \Delta\theta) \cos \phi) + \bar{\gamma}_s \sin^2(\pi/M - \Delta\theta)}{\bar{\gamma}_s (1 + \cos(\pi/M - \Delta\theta) \cos \phi)} \quad (29)$$

4 数值结果和讨论

上节着重推导了多种信道条件下 MPSK 相干解调和 MDPSK 差分解调在有相位噪声时的误符号率公式, 即 AWGN 信道下的公式(12)、(13), Nakagami- m 衰落信道下的公式(19)、(20)以及莱斯衰落信道下的公式(27), 特别是前两个公式是后续公式的推导基础. 因而, 很有必要通过计算机仿真和数值方法, 对前两个公式进行验证, 以确保整个理论分析过程的正确性. 假定输入的调制比特流经过格雷编码, 那么 $P_{b, M(D)PSK} = P_{s, M(D)PSK} / \log_2^M$; 由于误符号率是相位噪声的偶函数, 因此只需考虑相位噪声取非负值的情况; 性能仿真和数值计算则基于 MATLAB 软件进行.

图2给出了 AWGN 信道中五种常用相位调制方式在含有固定相位噪声时的误比特率和符号信噪比的理论和仿真曲线. 可见: 理论和仿真结果非常吻合, 这充分说明了公式(12)、(13)的正确性.

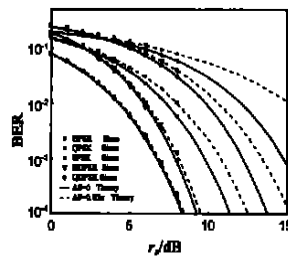


图2 误比特率 ~ 符号信噪比, AWGN 信道

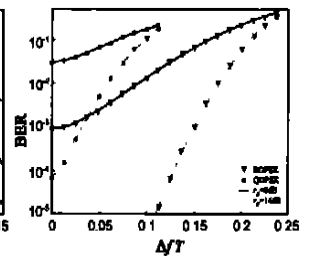


图3 误比特率 ~ 频差, AWGN 信道

利用本文推导的 MPSK 和 MDPSK 符号率公式, 可以很方便得到平均误符号率: 运用数值方法, 对相位噪声的分布求平均即可. 文献[12, 13]就分析了 BPSK(QPSK)和 BPSK/DS-SS 的平均误比特率. 作为 MDPSK 应用例子, 下面分析了频差对 MDPSK 误符号率的影响. 假定收端频差为 Δf , 则式(1)中 z_n 的相干相位 θ_n 可表示为:

$$\theta_n = 2\pi n \Delta f T + \theta_0 \quad (30)$$

其中, T 为符号周期, θ_0 为初始相位, $\Delta f T$ 表示相对频差. 那么 MDPSK 差分解调时由频差引起的相位噪声为:

$$\Delta\theta = \theta_{n-1} - \theta_n = -2\pi \Delta f T \quad (31)$$

将上式代入不同信道中的误符号率公式, 即可得到相应信道

下误符号率和频差的关系式。

图 3 给出了 AWGN 信道中 MDPSK 误比特率和频差的关系曲线。可见,随着频差增大,误比特率也相应增大;并且 M 越大,MDPSK 性能对频差也越敏感;若将频差折算为式(31)所示的相位噪声,图 3 与式(8)说明也是完全吻合的。此外,根据实际系统中频差校正算法的精度和工作时的符号信噪比,可以由图中曲线估算出系统在最差情况下的误比特率,从而对系统性能有一个直观的评估。

5 结论

本文的核心工作是利用高斯噪声扰动下两个矢量夹角分布特性,在统一框架下,推导了 AWGN、Nakagami-m 衰落和莱斯衰落信道下带有相位噪声的 MPSK 和 MDPSK 误符号率公式。这些基础性公式简洁直观,可以很方便地用于评估 MPSK、MDPSK 系统的性能。

参考文献:

- [1] J G Proakis. Digital Communication, 3rd ed[M]. New York: McGraw-Hill 1995.
- [2] R F Pawula, S O Rice, J H Roberts. Distribution of the phase angle between two vectors perturbed by Gaussian noise [J]. IEEE Trans On Commun, 1982, 30(8): 1828- 1841.
- [3] M K Simon, M S Abuini. A unified approach to the performance analysis of digital communication over generalized fading channels [J]. IEEE Proceeding, 1998, 86(9): 1860- 1877.
- [4] M K Simon, M S Alouini. A unified approach to the probability of error for noncoherent and differentially coherent modulations over generalized fading channels [J]. IEEE Trans On Commun, 1998, 46(11): 1625- 1638.
- [5] J Sun, I S Reed. Performance of MDPSK, MPSK and noncoherent MFSK in wireless Rician fading channels [J]. IEEE Trans On Commun, 1999, 47(6): 813- 816.
- [6] R F Pawula. Generic error probabilities [J]. IEEE Trans On Commun, 1999, 47(5): 697- 702.
- [7] R F Pawula. Distribution of the phase angle between two vectors perturbed by Gaussian noise II [J]. IEEE Trans On Veh Technol, 2001, 50(3): 576- 583.
- [8] M K Simon, D Divsalar. Some new twists to problems involving the Gaussian probability integral [J]. IEEE Trans On Commun, 1998, 46(2): 200- 210.
- [9] G Kaplan, U Ram. Bound on performance for the noisy reference PSK channel [J]. IEEE Trans On Commun, 1990, 38(10): 1699- 1707.
- [10] P Y Kam, S K Teo, et al. Approximate results for the bit error probability of binary phase shift keying with noisy phase reference [J]. IEEE Trans On Commun, 1993, 41(7): 1020- 1022.

- [11] P Y Kam, S K Teo, et al. Error probability of 2DPSK with phase noise [J]. IEEE Trans On Commun, 1994, 42(7): 2366- 2369.
- [12] M K Simon, M S Alouini. Simplified noisy reference loss evaluation for digital communication in the presence of slow fading and carrier phase error [J]. IEEE Trans On Veh Technol, 2001, 50(2): 480- 486.
- [13] T Eng, L B Milstein. Partially coherent DS-SS performance in frequency selective multipath fading [J]. IEEE Trans On Commun, 1997, 45(1): 110- 117.

作者简介:



程云鹏 男, 1977 年 1 月出生于湖北天门, 1997、2000、2003 年在解放军理工大学通信工程学院分获工学学士、硕士和博士学位, 现留校任教, 曾获军队科技进步一等奖一项, 主要从事移动通信、短波通信、信号处理、扩频系统等方面的研究工作。Email: chengyp2000@vip.sina.com



王金龙 男, 1963 年 3 月出生于河北海兴, 1992 年在通信工程学院获博士学位, 现为通信工程学院副院长、首席教授、博士生导师, 曾获军队科技进步一等奖三项, 二等奖一项, 主要研究方向涉及移动通信、短波通信、信号处理和软件无线电等领域。



沈良 男, 1967 年 11 月出生于浙江湖州, 现为通信工程学院教授, 曾获军队科技进步一等奖三项, 二等奖一项, 主要研究方向涉及短波通信、数字信号处理和软件无线电等领域。



任国春 男, 1965 年 2 月出生于江苏常熟, 现为通信工程学院教授, 曾获军队科技进步一等奖三项, 二等奖一项, 主要研究方向涉及短波通信、软件无线电等领域。