

阴影移动卫星信道中采用 DPD 和 MRC 的 PRCPM 的检测性能

杨龙祥, 傅海阳, 鄢广增, 汪海燕

(南京邮电学院通信工程系, 江苏南京 210003)

摘要: 本文给出了阴影移动卫星信道中采用差分相位检测(DPD)和最大比组合(MRC)的部分响应连续相位调制(PRCPM)信号的检测性能,并给出了实际阴影移动卫星信道中该方案的检测性能数值计算结果.

关键词: 移动卫星通信系统; PRCPM; 差分检测; MRC

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)06-0766-04

The Performance of PRCPM with DPD and MRC in Shadowed Satellite Mobile Channel

YANG Long xiang, FU Hai yang, FENG Guang zeng, WANG Hai yan

(Dept of Telecom Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: A bit error probability (BEP) computation formula for binary partial response continuous phase modulation (PRCPM) with differential phase detection (DPD) and maximum ratio combining (MRC) in shadowed satellite mobile channel is presented in this paper. BEP of PRCPM with DPD and MRC in different measured shadowed mobile satellite channels are computed also.

Key words: mobile satellite communication system; PRCPM; differential detection; MRC

1 引言

部分响应连续相位调制(PRCPM)是一类恒包络相位调制,具有很高的带宽和功率利用率,因此近年来在地面移动通信系统和卫星移动通信系统中受到广泛重视和研究^[1~9]。由于移动卫星信道(MSC)中存在多径衰落和阴影衰落、多谱勒频移和相位不稳定性,因此非相干检测(如差分相位检测)比相干检测更为合适各种 PRCPM 方案,特别是采用差分相位检测(DPD)的 GMSK 信号在高斯信道(GC)、陆地移动信道(LMC)和 MSC 中的检测性能已有广泛的研究^[1~9]。GC 和 LMC 为 MSC 的特殊情形,如当 MSC 中的莱斯因子 K 为无穷大时便得到 GC,而当 K 为 0 时便得到 LMC。研究表明,当 K 较小时,要达到要求的误比特率(BEP),则要求较高的每比特能量信噪比,解决此问题的一种方法是采用分集接收。研究表明^[4],在 MSC 中采用检测后 MRC 可以获得最小的 BEP。若干文献^[1~9]对 LMC 和 MSC 中采用 DPD 和 MRC 的 PRCPM 的检测性能进行了分析,但这些分析都假定 LMC 为莱斯信道,即地面移动终端收到的信号由恒定的直射信号(LOS 信号)、瑞利分布的多径信号和高斯噪声组成。但 LMC 中地面移动终端收到的直射信号是非恒定的,文献[5]的研究表明,在 MSC 中,由于在地面移

动终端和卫星之间的传输路径上存在障碍物(如建筑物、桥梁、树木等),因此直射信号受到阴影作用,地面终端收到的 LOS 信号是起伏的。LOS 信号的起伏随着频率的提高而增加;另一方面,阴影作用的时间长短与卫星的仰角有关,仰角高则阴影作用的时间短,而仰角低则阴影作用的时间长;阴影作用的时间长短还与地面移动终端所处的环境有关,当移动终端在市区时,阴影作用的时间长,而在农村则时间短。文献[5]中定义了阴影作用时间因子 A , A 表示存在阴影作用的时间与总工作时间的比值。文献[5]的实测数据表明,市区中 A 的大小在 0.54 到 0.89 之间,而农村高速公路上 A 的大小在 0.002 到 0.24 之间。对于市区中的移动终端,大部分时间存在阴影作用。文献[5]同时研究了 DPSK 的 BEP,研究表明阴影作用下的 BEP 与不考虑阴影作用的 BEP 有着相当大的差别,因此在分析设计移动卫星通信系统时,必须考虑阴影对检测性能的影响。

目前文献中有关 MSC 中的 PRCPM 的性能分析都假定信道为莱斯分布的,即没有考虑阴影的作用。本文首次分析了采用 DPD 和 MRC 的 PRCPM 信号在阴影 MSC 中的性能,推导了 BEP 计算公式,并给出了数值计算结果。本文的分析和结论对于移动卫星系统的分析和设计具有一定的参考意义。

2 系统模型

2.1 部分响应连续相位调制信号

单位幅度的二元 PRCPM 信号的复包络为

$$s(t, \alpha) = e^{j\phi(t, \alpha)} \quad (1)$$

其中 $\{\alpha_i = \pm 1\}$ 为发射码元。

$$\phi(t, \alpha) = \pi h \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i \beta(t - iT) \quad (2)$$

为已调信号的相位, h 为调制指数, T 为码元持续时间, 码元序列为 $\alpha = \{\dots \alpha_{i-1}, \alpha_i, \alpha_{i+1} \dots\}$, 并假定为独立序列。相位脉冲为

$$\beta(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau, \beta(\infty) = 1 \quad (3)$$

其中 $g(\tau)$ 为非负的归一化频率脉冲, 持续时间大于 T

2.2 阴影移动卫星信道(MSC)中的接收信号

假定接收机滤波器对信号无失真, 则阴影 MSC 中不采用分集接收时接收机的滤波器输出为

$$r(t, \alpha) = \sqrt{2S_0(t)} e^{j\phi_s(t, \alpha)} + \sqrt{P_d} e^{j\phi_d(t, \alpha)} \xi(t) + n(t) \quad (4)$$

$$\phi_s(t, \alpha) = \begin{cases} \phi(t, \alpha) + 2\mathcal{F}_{DT}, & \text{无多普勒频率跟踪环(DFTL)} \\ \phi(t, \alpha), & \text{有 DFTL} \end{cases} \quad (5)$$

$$\phi_d(t, \alpha) = \begin{cases} \phi(t - \tau, \alpha), & \text{无 DFTL} \\ \phi(t - \tau, \alpha) - 2\mathcal{F}_{DT}, & \text{有 DFTL} \end{cases} \quad (6)$$

其中: P_d 为多径信号的平均功率; $S_0(t)$ 为阴影作用下直射信号(LOS)分量的短期平均功率; τ 为 LOS 信号和多径信号间的时延差; f_D 为多普勒频移; $\xi(t)$ 为零均值归一化的复高斯过程, $\gamma_{\xi}(T)$ 为 $\xi(t)$ 的自相关函数; $n(t)$ 为零均值高斯噪声, 功率为 P_n , 其自相关函数为 $R_n(T)$ 。假定 $S(t, \alpha)$, $\xi(t)$, 和 $n(t)$ 为独立的随机过程。 $S_0(t)$ 为对数正态分布, 其概率密度函数为

$$f(S_0) = \frac{10}{S_0 \sqrt{2\pi\sigma \ln 10}} \exp\left[-\frac{(10\log S_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

其中: μ 为 $10\log S_0$ 的均值; σ^2 为 $10\log S_0$ 的方差。

文献[5]中把不存在阴影时直射信号的功率归一化为 1, 原文表 2 中给出了不同环境和不同卫星仰角下式(7)中的 μ 和 σ^2 值。为了能直接使用文献[5]中的实测数据进行计算, 本文也假定不存在阴影时直射信号的功率为 1。

不考虑 LOS 信号的阴影衰落时, MSC 可用莱斯因子和信噪比来描述, 莱斯因子 K 定义为(其中 P_s 为莱斯信道中直射信号的平均功率)

$$K = P_s/P_d = 1/P_d \quad (8)$$

信噪比(SNR)定义为

$$\text{SNR} = (P_s + P_d)/P_n = (1 + P_d)/P_n \quad (9)$$

SNR 与每比特能量信噪比之间的关系为

$$\text{SNR} = E/(N_0 B_n T) \quad (10)$$

2.3 差分相位检测(DPD)

采用 N 比特 DPD(N-DPD) 时, 第 K 个发送码元由下述积信号的相位来检测

$$z = r(kT + T, \alpha) r^*(kT + T - NT, \alpha) = A_z e^{j\phi_z} = z_I + jz_Q \quad (11)$$

$$\text{定义 } X = r(kT + T, \alpha), Y = jr(kT, \alpha) \quad (12)$$

2.4 最大比组合(MRC)

接收机采用 L 重 MRC, $l = 1, 2, \dots, L$ 各个接收机滤波器的输出信号与式(4)相同, 只需加上下标 l 。假定 $\xi_l(t)$ 和 $n_l(t)$ 是独立的随机过程。

$$\text{记 } D = \sum_{l=1}^L X_l Y_l^* + X_l^* Y_l \quad (13)$$

$$X_l = r_l(kT + T, \alpha) \quad Y_l = \Upsilon r_l(kT + T - NT, \alpha) \quad (14)$$

$$\Upsilon = \begin{cases} j & 1\text{-DPD}, \alpha_k = 1 \\ +1 & 2\text{-DPD}, \alpha_k = -\alpha_{k+1} = 1 \\ -1 & 2\text{-DPD}, \alpha_k = \alpha_{k+1} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

3 阴影 MSC 中 PRCPM 的 BEP 分析

假定对于 L 重分集信号, $P_{dl} = P_d$, $\tau_l = \tau$, $f_{Dl} = f_D$, 则采用与文献[4]类似的分析得到 $L > 1$ 时的 BEP 计算公式为

$$P(D < 0) = Q(a, b) - I_0(ab) e^{-0.5(a^2 + b^2)} + \frac{I_0(ab) e^{-0.5(a^2 + b^2)}}{(1 + v_2/v_1)^{2L-1}} \sum_{l=0}^{L-1} \binom{2L-1}{l} \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^l + \frac{e^{-0.5(a^2 + b^2)}}{(1 + v_2/v_1)^{2L-1}} \sum_{n=1}^{L-1} I_n(ab) \times \left\{ \sum_{i=0}^{L-1-n} \binom{2L-1}{i} \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^i - \left(\frac{a}{b}\right)^n \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{2L-1-n} \right\} \quad (16)$$

$L = 1$ 时的 BEP 计算公式为

$$P(D < 0) = Q(a, b) - \frac{v_2/v_1}{1 + v_2/v_1} I_0(ab) e^{-0.5(a^2 + b^2)} \quad (17)$$

其中 $I_n(x)$ 为第一类 n 阶修正贝塞尔函数

$$Q(a, b) = \begin{cases} e^{-0.5(a^2 + b^2)} \sum_{n=0}^{\infty} (a/b)^n I_n(ab), & \text{if } a < b \\ 1 - e^{-0.5(a^2 + b^2)} \sum_{n=1}^{\infty} (b/a)^n I_n(ab), & \text{if } b < a \end{cases};$$

$$a = \frac{[v_1^2 v_2 (\alpha_1 v_2 - \alpha_2)]^{0.5}}{v_1 + v_2}; \quad b = \frac{[v_2^2 v_1 (\alpha_1 v_1 + \alpha_2)]^{0.5}}{v_1 + v_2};$$

$$v_1 = \frac{(\mu_{XX}\mu_{YY} - \mu_{XY}^2)^{0.5} - \mu_{XY}}{\mu_{XX}\mu_{YY} - |\mu_{XY}|^2}; \quad v_2 = \frac{(\mu_{XX}\mu_{YY} - \mu_{XY}^2)^{0.5} + \mu_{XY}}{\mu_{XX}\mu_{YY} - |\mu_{XY}|^2}.$$

对于本文阴影作用下的 MSC, 经过繁杂的计算可得各量分别为

$$\mu_{XX} = \mu_{YY} = \frac{(K\bar{P}_s - 0.5\bar{A}_s^2 K + 1)\text{SNR}}{K + 1} + 1 \quad (18)$$

$$\mu_{XY} = \Upsilon^* \left[(\bar{P}_s - 0.5\bar{A}_s^2) \frac{K_s \text{SNR}}{K + 1} e^{j\phi_s(NT, \alpha)} + \frac{\text{SNR}}{K + 1} e^{j\phi_d(NT, \alpha)} \gamma_{\xi}(nt) + \gamma_n(NT) \right] \quad (19)$$

$$\alpha_1 = \frac{2L\bar{A}_s^2 K_s \text{SNR}}{K + 1} \left[1 + \frac{\text{SNR}}{K + 1} (1 - \gamma_{\xi}(NT) \cos[\Phi_s(NT, \alpha)] - \Phi_d(NT, \alpha)] - \gamma_n(NT) \cos \Phi_s(NT, \alpha) \right]$$

$$\alpha_2 = \frac{2KL_s \text{SNR}\bar{A}_s^2}{K + 1} \text{Re}(\Upsilon^* e^{j\phi_s(NT, \alpha)}) \quad (20)$$

其中:

$$\Phi_s(NT, \alpha) = \begin{cases} \Phi(NT, \alpha) + 2\mathcal{F}_{DT}, & \text{无 DFTL} \\ \Phi(NT, \alpha), & \text{有 DFTL} \end{cases};$$

$$\Phi_{li}(NT, \alpha) = \begin{cases} \Phi(NT, \alpha, \tau), \text{ 无 DFIL} \\ \Phi(NT, \alpha, \tau) - 2\mathcal{F}_D NT, \text{ 有 DFIL} \end{cases}$$

$$\Phi(NT, \alpha, \tau) = \pi h \sum_i \alpha_{k-i} \int_{\tau^+}^{\tau^-} \int_{\tau^+}^{\tau^-} g(t) dt;$$

$$\bar{A}_s = \int_0^\infty \left\{ \frac{\sqrt{2S_0}}{S_0} \frac{10}{\sqrt{2\pi\sigma\ln 10}} \exp\left[-\frac{(10\log S_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} dS_0;$$

$$\bar{P}_s = \int_0^\infty \left\{ \frac{10}{\sqrt{2\pi\sigma\ln 10}} \exp\left[-\frac{(10\log S_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} dS_0.$$

至此, 式(16)和(17)中的各个变量都已求出, 可以用上述公式计算阴影 MSC 信息中采用 DPD 和 MRC 检测的 PRCPM 信号的检测性能。

如果令 $\mu = 0\text{dB}$, $\sigma^2 = 0\text{dB}$, 则式(16)或(17)为无阴影作用的 MSC 中 PRCPM 信号的 BEP; 如果令 $\mu = 0\text{dB}$, $\sigma^2 = 0\text{dB}$, $K = 0$, 则式(16)或(17)为地面移动信道(LMC)中 PRCPM 信号的 BEP 计算公式。在上述两种特殊情形下, 本文的 BEP 计算公式与文献[4]中的计算公式相同, 这也证明了本文分析方法和公式的正确性。

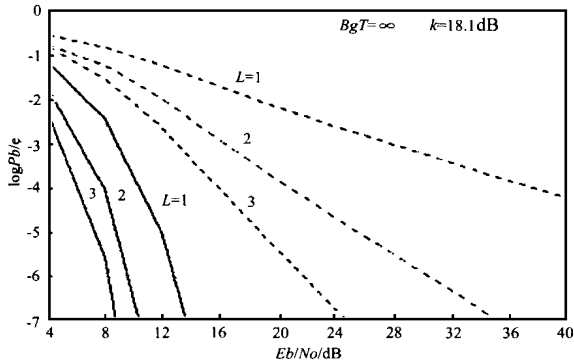


图1 高速公路上 MSK 信号的 BEP

4 数值计算结果与结论

利用文献[5]中的实测数据, 进行了大量的数值计算来分析比较阴影对采用 DPD 和 MRC 的 PRCPM 信号检测误比特率的影响。图 1 为 $K = 18.1\text{dB}$, $\mu = -7.9\text{dB}$, $\sigma^2 = 4.8\text{dB}$ (卫星仰角为 21 度、高速公路) 时 MSK ($B_g T = \infty$) 信号的 BEP。图 2 为 $K = 6.5\text{dB}$, $\mu = -15.6\text{dB}$, $\sigma^2 = 3.8\text{dB}$ (卫星仰角为 43 度、市区) 时 MSK 信号的 BEP。图 3 为 $K = 18.1\text{dB}$, $\mu = -7.9\text{dB}$, $\sigma^2 = 4.8\text{dB}$ (卫星仰角为 21 度、高速公路) 时 GMSK ($B_g T = 0.25$) 信

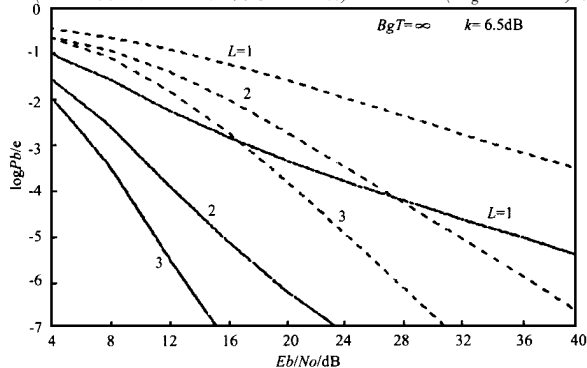


图2 市区内 MSK 信号的 BEP

号的 BEP。图 4 为 $K = 6.5\text{dB}$, $\mu = -15.6\text{dB}$, $\sigma^2 = 3.8\text{dB}$ (卫星仰角为 43 度、市区) 时 GMSK ($B_g T = 0.25$) 信号的 BEP。上述四幅图中实线为无阴影作用时的 BEP, 虚线为阴影作用下的 BEP, MRC 的重数 L 分别为 $L = 1, L = 2$, 和 $L = 3$ 。由上述各图中的数值计算结果可以看出, 阴影对系统的 BEP 有着很大的影响, 特别当移动终端位于市区内时。因此在设计移动卫星通信系统时必须分析计算阴影对系统性能的影响, 否则按照无阴影作用下所设计出的链路预算不能保证系统要求的 BEP。

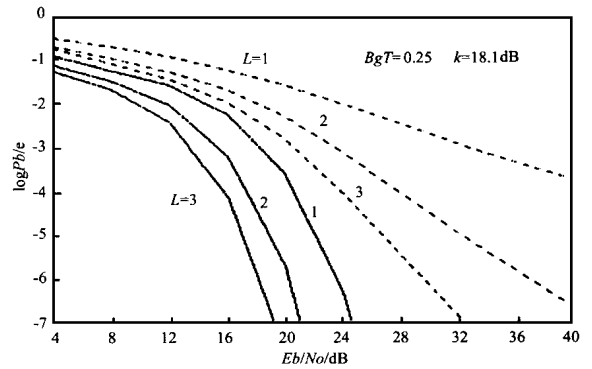


图3 高速公路上 GMSK ($B_g T = 0.25$) 的 BEP

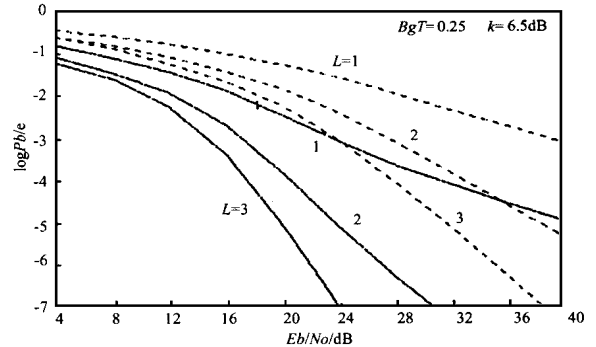


图4 市区内 GMSK 信号 ($B_g T = 0.25$) 的 BEP

本文首次给出了阴影移动卫星信道中采用差分相位检测和最大比组合接收的部分相应连续相位调制信号的误比特率计算公式。大量的数值计算表明: 阴影信道下的误比特率比莱斯信道模型下的误比特率要大得多。而由于移动卫星系统中 LOS 信号会受到阴影影响, 特别是当移动终端位于市区时大多数时间 LOS 信号收到阴影作用, 因此设计和分析移动卫星通信系统时必须考虑阴影对系统性能的影响。本文给出的 BEP 计算公式可用于移动卫星系统的分析和设计。

参考文献:

- [1] J B Anderson, T Aulin and C E Sundberg. Digital Phase Modulation [M]. New York, Plenum, 1986.
- [2] I Kom. Error probability of digital modulation in satellite mobile, land mobile and Gaussian channels with narrowband receiver filter [J]. IEEE Trans. Commu., 1992, 40(2): 697-707.
- [3] S E Elnoubi. Probability of error analysis of partial response phase modulation with two bit differential detection and offset receiver diversity in fast Rayleigh fading channels [J]. IEEE Trans. Commu., 1990, 38,

(3): 782-786.

- [4] I Kom. Binary PRCPM with differential phase detection and maximal ratio combining diversity in fading channels [J]. IEEE Trans. Vehicular Technol., 1998, 47(3): 936-946.
- [5] Erich Lutz, Daniel Cygan, et al. The land mobile satellite communication channel—recording, statistics, and channel model [J]. IEEE Trans. Vehicular Technol., 1991, 40(2): 375-386.
- [6] G K Kaleh. Differentially coherent detection of binary partial response continuous phase modulation with index 0.5 [J]. IEEE Trans. Commun., 1990, 39, (6): 1335-1340.
- [7] J Horikoshi, S Shimura. Multipath distortion of differentially encoded GMSK with 2-b differential detection in bandlimited frequency selective mobile radio channel [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1990, 39(6): 308-315.
- [8] C Tellambura. Analysis of M-ary phase shift keying with diversity reception for land mobile satellite channels [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1997, 46(4): 910-922.
- [9] Matthias Patzold, Yingchun Li, Frank Laue. A study of a land mobile satellite channel model with asymmetrical doppler power spectrum and lognormally distributed line-of-sight component [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1998, 47(1): 297-310.

- [10] J G Proakis. Digital Communications [M], New York: McGraw Hill, 1989.

作者简介:



杨龙祥 男, 1966 年生, 博士, 南京邮电学院通信工程系副教授, 江苏省高校中青年骨干教师, 在《Chinese Science Bulletin》等学术刊物上发表论文四十多篇。

傅海阳 副教授, 享受政府特别津贴, 在学术刊物上发表论文多篇。

鄂广增 教授, 南京邮电学院通信工程系主任, 在《电子学报》等学术刊物上发表论文多篇。