

技术报告

Ka 频段卫星通信信道建模及系统性能仿真

王爱华, 罗伟雄

(北京理工大学 电子工程系, 北京 100081)

摘要: 本文给出了卫星通信系统设计、建模和仿真的一般方法, 重点是 Ka 频段卫星通信信道的建模及仿真。我们首先分析了 Ka 频段卫星通信信道的统计特性, 建立了信道的统计模型, 然后在此基础上建立了 Ka 频段卫星通信信道及系统的仿真模型, 并进行了系统性能的仿真, 最后利用分析法分析推导了相干 BPSK 信号在 Ka 频段的系统性能, 并与仿真结果进行了比较, 得出了有用的结论。

关键词: Ka 频段; 信道模型; 性能仿真

中图分类号: TN927.2

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2001)07- - 09

Modelling of Ka-band satellite communication channel and system performance simulation

WANG Ai-hua, LUO Wei-xiong

(Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract: This paper presents a general method for satellite communication system design, modelling and simulation. Stress is placed on modelling and simulation of a Ka-band satellite communication channel. Statistical characteristics and model of the channel at Ka-band are given firstly, then we conducted the system performance simulations based on the channel and system simulation model proposed by this paper. Finally the analytical derivation of the performance of coherent BPSK signal at Ka-band is described and a useful conclusion is drawn by comparing with the simulation results.

Key words: Ka-band; channel model; performance simulation

1 前言

随着对卫星通信需求的增加以及新技术的发展, 近年来, 越来越多的国家和机构相继加入到对 Ka 频段卫星通信系统的开发和使用之中。例如, 许多 LEO 系统将使用 20/30GHz 链路, 新一代的跟踪及数据中继卫星 (TDRS) 将使用 Ka 频段进行实验, NASA 打算利用高于 30GHz 的频率进行深空通信等。目前, 该频段已不止用作商用, 其军用价值也日益显露, 美国军方已开始使用 20/40GHz 链路进行军事通信。

与较低频率的 C 频段和 Ku 频段相比, Ka 频段的卫星通信具有三个明显优势, 即频谱可用

收稿日期: 2000-05-24; 修订日期: 2001-05-09

作者简介: 王爱华 (1965 年 -), 女, 天津人, 北京理工大学 98 级博士生, 主要研究方向为卫星通信系统设计及仿真分析技术研究等; 罗伟雄 (1940 年 -), 男, 上海人, 北京理工大学应用电子技术教研室主任, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信与电子系统和电路理论。

率高、潜在干扰小和设备体积小等。然而, Ka 频段卫星通信也存在一大缺点,即该频段对大气损伤非常敏感。测量数据表明^[1],在大于 0.1 % 的时间内对于 30GHz 的上行频率雨衰可超过 40dB,而对于 20GHz 的下行频率雨衰也将超过 20dB。

针对 Ka 频段卫星通信信道的这一特点,要想预测卫星通信系统在 Ka 频段的性能,我们首先需要了解 Ka 频段信道的统计特性,然后再在此基础上建立相应的系统功能模型,才能进行功能评估。本文在进行功能评估时,主要采用了两种方法,即分析法和仿真法。

通信系统的计算机仿真技术是随着通信理论及计算机技术的不断发展而日益成熟的,并已逐渐成为通信系统设计必不可少的、强有力的工具,仿真中利用等效复基带概念,很容易实现从基带到基带的整个信号流程的仿真。

2 Ka 频段卫星通信信道的传输特性

在 20/30GHz 的卫星通信中,由于大气层(雨、水蒸汽、云雾、氧气和闪烁)将会引起信号的额外衰落,因此,自由空间传播公式需要进行修正。这些衰落不仅是频率的函数,而且还是位置、仰角、季节和系统可行性的函数,其中一些衰落(例如雨衰)的年平均值将随载波频率和系统可行性的增加而迅速增大。下面分别讨论之。

(1) 雨衰 A_r 由于降雨而引起的信号衰落是 Ka 频段卫星通信所经受的最严重的传播损耗。测量数据表明,雨衰是载波频率和系统可行性的函数。在大仰角情况下, A_r 可用下式表示^[2]

$$[A_r] = C_1 \exp(-\gamma_1 f) + C_2 \exp(-\gamma_2 f) - (C_1 + C_2) \quad (\text{dB})$$

式中 $f(\text{GHz})$ 为载波频率, C_1 , C_2 , γ_1 和 γ_2 是系统可行性的函数。在仰角较小时(例如小于 10°), A_r 可用下述转换公式进行换算得到

$$[A_r(\theta)] = [A_r(\theta_0)] \sin \theta / \sin \theta_0 \quad (\text{dB})$$

式中 θ 为地球站仰角, θ_0 为参考仰角。

(2) 大气吸收 主要是氧气和水蒸汽吸收损耗。其中氧气的吸收损耗与温度和气压有关。ITU-R 给出了倾斜路径下氧气吸收损耗的表达式^[3]

$$[A_o] = (h_o \gamma_o) / \sin \theta \quad (\text{dB})$$

式中 $\gamma_o(\text{dB/km})$ 表示氧气损耗系数, $h_o(\text{km})$ 为干燥空气的有效高度, θ 为仰角。

水蒸汽的吸收损耗主要与温度有关。ITU-R 给出了相应的水蒸汽吸收损耗表达式^[3]

$$[A_w] = (h_w \gamma_w) / \sin \theta \quad (\text{dB})$$

式中 $\gamma_w(\text{dB/km})$ 表示水蒸汽损耗系数, $h_w(\text{km})$ 为水蒸汽的有效高度, θ 为仰角。

测量数据表明

$$[A_o] + [A_w] \approx 1 \quad (\text{dB})$$

(3) 云雾衰落 A_c 在 Ka 频段上,沿着传播路径的云雾将使信号受到衰落,该衰落量的大小与液体水的含量及温度有关。ITU-R 给出的云雾衰落表达式为^[4]

$$[A_c] = (0.4095fL) / [(1 + \epsilon''^2) \sin \theta] \quad (\text{dB})$$

式中 L 为云雾厚度(近似为 1km), ϵ' 和 ϵ'' 分别为水的介电常数的实部和虚部, $f(\text{GHz})$ 为载波频率, $\theta = (2 + \epsilon'') / \epsilon'$, θ 为仰角。

(4) 大气层闪烁 A_s 由于大气层折射率的时变性引起的衰落,它将使传输信号幅度和相位迅速波动。

根据 ITU-R 建议,总衰落值 A_t 可用下式进行计算^[5]

$$[A_t] = [A_c] + [A_o] + [A_w] + \sqrt{[A_r]^2 + [A_s]^2} \quad (\text{dB})$$

在包括了由于雨、水蒸汽、云雾、氧和闪烁带来的各种额外衰减后,卫星通信系统设计中的自由空间传播公式应该作如下修正,即

$$P_R = (P_T A_T A_R / c^2 l^2) \cdot (f^2 / A_t) = (P_T A_T A_R / c^2 l^2) \cdot m(f, P_o) \quad (\text{W})$$

式中 P_R 和 P_T 分别表示接收和发送载波平均功率(W), f (Hz) 为载波频率, l (m) 为卫星至地球站终端的距离, c (m/s) 为真空中的光速, A_R 和 A_T 分别为接收和发射天线的有效面积, A_t 为链路总衰减, P_o 为系统不可用率。

我们注意到乘法因子 $m(f, P_o) = f^2 / A_t$ 将随 f 的增大而增大,但同时,由于 A_t 也将随 f 的增大及系统可行性的增大而迅速增大,又将使 $m(f, P_o)$ 随 f 的增大而减小。数值计算表明^[2],在系统可行性较低时(如系统可行性低于 99.7%),乘法因子 $m(f, P_o)$ 将在很宽的频率范围内基本不变。由于 Ka 频段卫星通信系统的可行性要求通常低于 99.7%,因此, Ka 频段卫星通信信道总衰落可以认为是非频率选择性衰落,即整个信道可以看成由带内“平坦”的衰落与加性高斯白噪声(AWGN)组成,而且这一平坦衰减随时间变化非常缓慢,它只与天气情况有关^[6]。

3 Ka 频段卫星通信信道统计模型的建立

假设我们通过信道发送一个数字调制信号 $s(t)$, 且 $s(t) = \text{Re}[s_1(t) \exp(j2\pi f_c t)]$, 其中 $s_1(t)$ 为其时域复基带表达, $S_1(f)$ 为其频域复基带表达, 则其等效低通接收信号(不包括 AWGN) 用其频域表达式可以表示为

$$r_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} C(f, t) S_1(f) \exp(j2\pi ft) df$$

式中 $C(f, t)$ 为信道的时变传输函数。由前节分析可知,在信号频带内, Ka 频段信道为非频率选择性信道,因此信道的时变传输函数 $C(f, t)$ 在信号带宽内可以看成为与频率无关的复值量。考虑到 $S_1(f)$ 的频谱集中在 $f = 0$ Hz 附近,因此,可以将 $C(f, t) = C(0, t)$ 代入上式,于是我们得到

$$\begin{aligned} r_1(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} C(0, t) S_1(f) \exp(j2\pi ft) df \\ &= C(0, t) \int_{-\infty}^{\infty} S_1(f) \exp(j2\pi ft) df \\ &= C(0, t) s_1(t) = \gamma(t) \exp(j\phi(t)) s_1(t) \end{aligned}$$

即接收信号可以表示为发送信号乘以代表信道时变特性的复值随机过程 $C(0, t)$ 。我们称 $C(0, t) = \gamma(t) \exp(j\phi(t))$ 为信道乘性衰落过程。其中 $\gamma(t)$ 代表等效低通信道的包络过程,而 $\phi(t)$ 则代表等效低通信道的相位过程,二者均为实随机过程。

下面,我们再进一步简化上式。由第二节分析还可知,信道衰落随时间变化非常缓慢,因此,信道乘性衰落过程至少在一个符号间隔内可以看作作为一个常数。这样上式就可以进一步简化为

$$r_1(t) = \exp(j\phi) s_1(t) \quad 0 \leq t \leq T$$

式中 T 为调制码元宽度。和 ϕ 分别表示等效低通信道的包络和相位,二者均为实随机变量。有关 γ 和 ϕ 的概率分布特性,前人利用 Olympus 星、Italsat 星和 ACTS 星作了许多传播特性测量实验,积累了大量数据^[7]。最新研究表明 Ka 频段固定卫星通信信道特性主要由天气条件决定,其

信号包络和相位的概率分布均为高斯分布,它们的概率密度函数分别表示如下^[6]

$$p(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(r - m_r)^2}{2\sigma_r^2}\right)$$
$$p(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\phi - m_\phi)^2}{2\sigma_\phi^2}\right)$$

式中 $p(r)$ 为信号包络的概率密度函数, $p(\phi)$ 为信号相位的概率密度函数。 σ_r^2 和 σ_ϕ^2 分别为信号包络和相位的方差,而 m_r 和 m_ϕ 分别为相应的均值。表 1 和表 2 分别给出了 Ka 频段固定卫星通信信道在各种天气条件下信号包络和相位的概率分布参数。

表 1 固定卫星通信信道包络模型^[6]

天气条件	均值 m	方差 σ^2
晴天	0.455	0.00056
黑云	0.346	0.00272
小雨	0.483	0.00003
雷雨	0.436	0.01386
小雪	0.5	0.00021
冰霜	0.482	0.00062
中雨	0.662	0.02

表 2 固定卫星通信信道相位模型^[6]

天气条件	均值 m	方差 σ^2
晴天	0.0079	0.00381
黑云	0.0154	0.00864
小雨	0.0088	0.00546
雷雨	0.0068	0.00414
小雪	0.0089	0.00435
冰霜	0.0094	0.00544
中雨	-0.0089	0.03077

由此,我们可以建立 Ka 频段固定卫星通信信道统计模型,如图 1 所示,在此模型中,我们用 $C(t) = \exp(j\phi)$ 表示信道乘性干扰矢量, $z(t)$ 表示加性白高斯噪声。

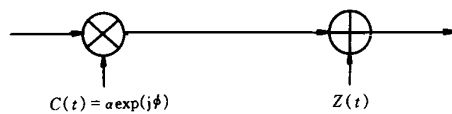


图 1 Ka 频段固定卫星通信信道统计模型

4 Ka 频段卫星通信信道仿真模型的建立和系统 BER 性能仿真

4.1 Ka 频段卫星通信信道仿真模型的建立

由上面分析可知, Ka 频段卫星通信信道可以用乘性干扰矢量 $C(t)$ 和加性高斯白噪声 $z(t)$ 来模拟,因此,我们可以建立如图 2 所示的信道仿真模型。

图 2 中高斯过程 1 和高斯过程 2 为两个相互独立的带限、零均值高斯随机过程,其方差分别等于 σ_1^2 和 σ_2^2 。高斯过程 1 与实常数产生器 1 产生的 m 相加后,生成均值为 m 、方差为 σ_1^2 的高斯随机过程。同理可产生高斯随机过程 ϕ 。 ϕ 经指数产生器生成 $\exp(j\phi)$ 后,与 σ_1^2 相乘,得

4.3 仿真结果

图5显示了仅有信号包络衰落时,在不同天气条件下,相干BPSK信号在Ka频段传输的链路误码率性能。为便于比较,图中还同时给出了理想AWGN信道的误码率性能。从图5可以看出,雷雨天气时信号衰落最大。例如,在 $P_e = 10^{-4}$ 时, E_b/N_0 将损失23.6dB。

图6显示了仅有信号相位衰落时,在不同天气条件下,相干BPSK信号在Ka频段传输的链路误码率性能。为便于比较,图中也同时给出了理想AWGN信道的误码率性能。从图6可以看出,相位衰落基本上不会引起 E_b/N_0 损失。由此可以得出以下结论:与信号包络衰落引起的损失相比,信号相位衰落引起的损失几乎可以忽略不计。

图7显示了不仅有信号包络衰落,还有信号相位衰落时,在不同天气条件下,相干BPSK信号在Ka频段传输的链路误码率性能。与上面两个仿真结果相比较,可以发现只有在中雨情况下,幅相同时衰落引起的 E_b/N_0 损失才稍大于仅有幅度衰落时的 E_b/N_0 的损失($P_e = 10^{-4}$ 或 $P_e = 10^{-5}$ 时, E_b/N_0 约多损失2dB),而在其他天气条件下,幅相同时衰落引起的 E_b/N_0 损失与仅有幅度衰落时的 E_b/N_0 的损失基本相同。因此,同样可以得出以下结论,即信号包络衰落引起的信号衰落接收信号衰落中起决定性的作用。

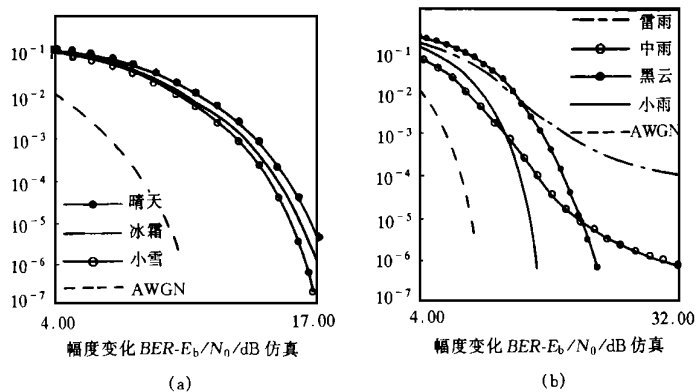


图5 不同天气条件下,仅有包络衰落时系统BER性能仿真

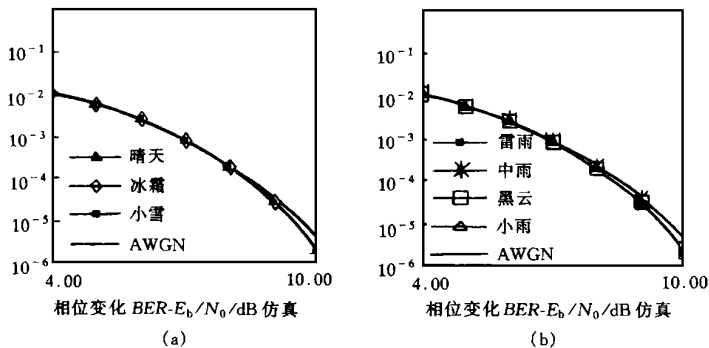


图6 不同天气条件下,仅有相位衰落时系统BER性能仿真

5 Ka频段卫星通信系统性能分析计算

为了与仿真结果进行比较,在此,我们利用分析法对Ka频段卫星通信系统BER性能进行

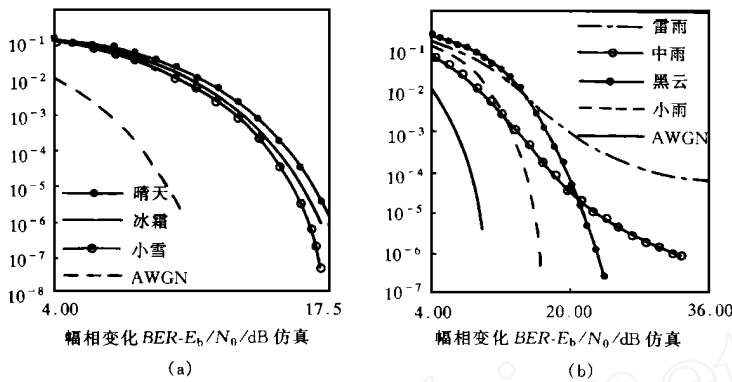


图 7 不同天气条件下,既有信号包络衰落,又有信号相位衰落时系统 BER 性能仿真

计算分析。由于分析法的局限性,我们只能分别计算信号包络衰落和信号相位衰落对系统性能的影响。

5.1 信号包络衰落对系统 BER 性能的影响

对于 BPSK 相干同步检测信号,在 AWGN 信道,其误码率为

$$P_e(r) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) = \frac{1}{2} \exp(-r^2)$$

式中 r 为未衰落的信噪比, r 为信号包络。当信号受到不同天气条件带来的衰落时,瞬时包络将起伏,根据受影响的包络特性,错误概率可通过求包络衰落的统计平均得到。因此,在 Ka 频段对于相干 BPSK 信号由于天气条件的影响而产生的平均误码率

$$\begin{aligned} P_e &= \int_0^\infty P_e(r) \cdot p(r) dr = \frac{1}{2} \int_0^\infty \exp(-r^2) \exp\left(-\frac{(r-m)^2}{2}\right) dr \\ &= \frac{1}{4} \frac{\exp\left[-\frac{m^2}{2}\left(1 - \frac{1}{1+2}\right)\right]}{\sqrt{1+2}} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{2}\sqrt{1+2}}\right)\right] \end{aligned}$$

5.2 信号相位衰落对系统 BER 性能的影响

对于相干 BPSK 信号,我们还必须考虑由于天气条件引起的信号相位变化带来的系统误码率的变化。对于相干 BPSK 信号,相位误差带来的误码率表达式如下^[9]

$$P_e(\phi) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\cos \phi})$$

与 5.1 中推导相似,通过求相位衰落的统计平均,可以得到相干 BPSK 信号由于天气条件的影响而产生的平均误码率

$$\begin{aligned} P_e &= \int_0^\pi P_e(\phi) \cdot p(\phi) d\phi \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\pi (-1)^n \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)}{(2n+1)!} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{2}\right) {}_1F_1\left(n + \frac{1}{2}, 2n+2, -\right) \end{aligned}$$

上式在 $m = 0$ 时成立。式中 ${}_1F_1(\cdot)$ 为合流超比级数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。

5.3 计算结果分析

利用数值计算技术,可以得到在各种天气条件下,相干 BPSK 信号在 Ka 频段的误码率性能

特性。

图 8 显示了不同天气条件下信号包络衰落时相干 BPSK 信号的误码率随 E_b/N_0 变化的计算曲线,为了便于比较还同时给出了相应情况下的误码率仿真性能曲线。由图 8 可以看出,分析界与仿真结果是比较吻合的。然而由于分析法计算出的误码率结果为性能分析上界,因此,仿真曲线(除雷雨天气外)均稍优于分析曲线(1dB 左右),而且随着 E_b/N_0 的增大,两者之间的差别逐渐减少。然而在雷雨天气下,却出现了两曲线相交的情况。分析出现这一现象的原因:在这种天气情况下,信道衰落比较严重,误码多以突发形式出现,因此,当误码计数较小时(例如 100),就会产生一定的测量误差。如果增大误码计数,则测量误差将会减小。

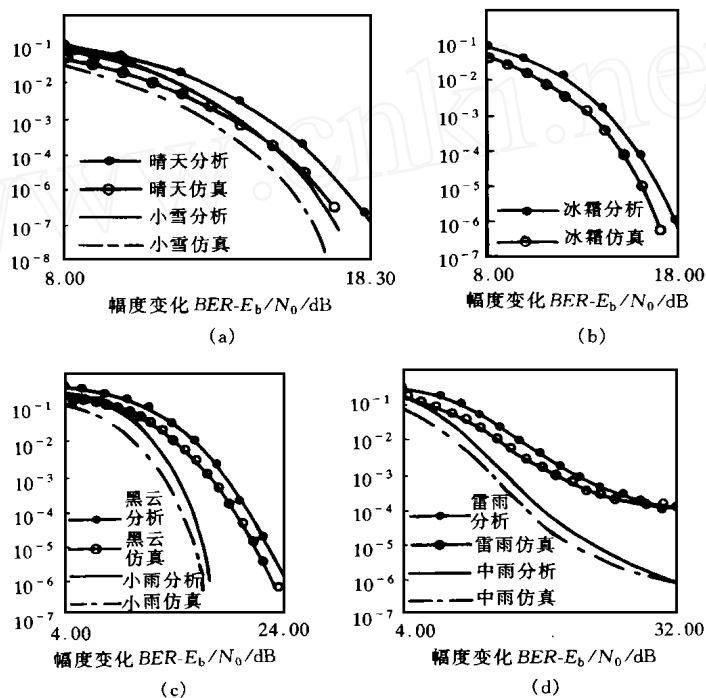


图 8 不同天气条件下,只有信号包络衰落时系统 BER 性能分析界与仿真曲线

图 9 显示了不同天气条件下信号相位衰落时相干 BPSK 信号的误码率随 E_b/N_0 变化的计算曲线,为了便于比较还同时给出了理想 AWGN 信道的误码率性能曲线。由图可以看出,与仿真结果相似,相位衰落引起的损失是很小的。由此同样可以得出以下结论:与信号包络衰落引起的损失相比,信号相位衰落引起的损失几乎可以忽略不计。同时,我们也将仿真结果与计算结果进行了比较,可以发现仿真曲线也稍优于分析曲线(在 $P_e = 10^{-4}$ 时,误差小于 0.4dB)。

通过以上分析可以看出,对于相干 BPSK 信号经 Ka 频段卫星通信链路传输的性能,在只有包络衰落或相位衰落时,仿真法与分析法均能给出明确的结论,而且两者所得结论基本吻合,这一结果证明了我们建立的 Ka 频段卫星通信信道仿真模型是正确、实用的。Ka 频段卫星通信信道仿真模型的建立是非常有意义的,因为,当通信系统越来越复杂(例如,系统中采用 RS 码为外码,卷积码为内码的级联码)或系统采用其他新型调制方式(例如 TCM)时,由于局限性与复杂性,分析法已很难有效地给出精确的结论。此时,利用已建立的、正确的系统仿真模型,可以用仿真法方便、准确地进行系统的性能分析。

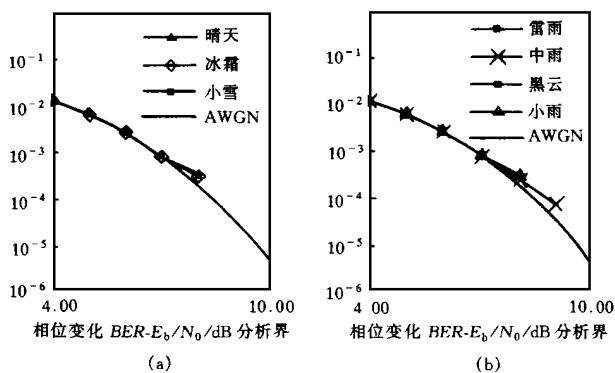


图9 不同天气条件下只有信号相位衰落时系统 BER 性能计算曲线

6 结束语

本文通过对 Ka 频段卫星通信信道统计特性的分析,建立了该信道的统计及仿真模型。该模型不仅适用于 BPSK 卫星通信系统性能的研究,而且还适用于采用其他调制与编码方式的卫星通信系统性能的研究,尤其适用于较复杂的卫星通信系统,因为此时分析法已很难给出较精确的结论。

作为一个实例,利用该模型对 BPSK 卫星通信系统 BER 性能进行了仿真研究。仿真结果与分析结果非常吻合,从而也证明了本文建立的 Ka 频段卫星通信信道仿真模型是正确、实用的。今后我们将利用该模型对其它卫星通信系统性能作进一步的研究。

参考文献:

- [1] SIVO J N. Advanced communication satellite systems[J]. IEEE J Selected Areas in Communications, 1983, SAC - 1 (4) :580 - 587.
- [2] MATRICCIANI E, RIVA C. Evaluation of the feasibility of satellite systems design in the 10 - 100 GHz frequency range[J]. Int J Satell Commun, 1998, 16(5) :237 - 247.
- [3] ITU-R Recommendation 676 - 1 - 1992, Attenuation by Atmospheric Gases in the Frequency Range 1 - 350 GHz, Propagation in Non-Ionized Media[S].
- [4] ITU-R Recommendation 840 - 1992, Attenuation due to Clouds and Fog, Propagation in Non-Ionized Media[S].
- [5] ITU-R Recommendation 618 - 4 - 1995, Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems, Propagation in Non-Ionized Media[S].
- [6] LOO C. Impairment of digital transmission through a Ka band Satellite channel due to weather conditions[J]. Int J Satell Commun, 1998, 16(3) :137 - 145.
- [7] LOO C. Statistical models for land mobile and fixed satellite communications at Ka band[A]. IEEE 46th Veh Technol Conf [C]. May 1996, Vol 2:1023 - 1027.
- [8] PROAKIS J G. Digital Communications[M]. New York:McGraw-Hill, 1995.
- [9] SCHWARTZ M, BENNETT W R, STEIN S. Communications Systems Techniques[M]. New York:McGraw-Hill, 1966.