

雨衰条件下卫星信道容量的性能分析

刘芸江¹, 黄国策¹, 甄蜀春², 李 曼¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘 要:雨衰是导致 Ka 频段(20/30 GHz)卫星链路信号衰落的主要原因。目前,多数降雨补偿算法从功率和带宽应用的角度出发建立在固定衰落门限基础上,这会导致不能充分利用信道容量。以卫星信道通信容量的最佳利用为基础,对雨衰条件下 Ka 频段通信容量的性能进行了讨论,在分析的基础上,得出了一些有意义的结论。

关键词:雨衰;信道容量;衰落门限;误码率

中图分类号:TN82 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)04-0050-03

卫星信道的拥挤已迫使系统的设计者考虑 Ka 频段的应用^[1~3],但工作在高频段的卫星不得不面临由于传输媒介所导致的衰减,其中最主要的衰落就是雨衰。通常,可以从功率、带宽和信道容量三方面来衡量卫星通信系统的综合性能指标。目前在 Ka 频段采用的抗雨衰的措施主要集中在:分集技术、功率控制技术、自适应编码/自适应调制技术、自适应 TDMA 和自适应 CDMA 上,但在不少的抗雨衰算法中,通常是从功率和带宽的有效利用的角度进行考虑、并建立在固定衰落门限基础上的,这往往以信道容量的下降为代价来保证链路可靠通信^[4~8]。目前,很少有从卫星信道通信容量的最佳利用的角度着手研究抗雨衰的措施,本文以卫星信道通信容量的最佳利用为出发点,对雨衰条件下 Ka 频段通信容量的性能进行分析和研究。

1 卫星链路的雨衰

对于具有透明转发器的卫星通信系统,由于雨衰造成的整个链路衰减^[9]为

$$A = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{i,c} - 10 \lg \left[\frac{1}{10^{\frac{S_u - A_u}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{S_d - A_d}{10}}} \right]^{-1} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

式(1)中, $(C/N_0)_{i,c}$ 为晴天的载噪比,单位为 dB, S_u 和 S_d 分别是晴天上行/下行载噪比, A_u 和 A_d 分别对应因雨衰造成的上行/下行衰减。

A_u 、 A_d 和 A 的概率密度函数是符合对数正态分布的, m 和 σ 分别对应正态分布的均值和方差,其概率密度函数如下所示:

$$P_A(u) = \frac{1}{u\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad u > 0$$

$$P_A(u) = 0 \quad u \leq 0$$

则雨衰 A 的概率分布函数为

$$F_A(x) = \text{Prob}(l \leq x) = \int_{-\infty}^x P_A(u) du \quad (3)$$

收稿日期:2003-12-26

基金项目:国防预研基金资助项目(51421010103jb3201)

作者简介:刘芸江(1976-),男,四川人,博士生,主要从事毫米波通信、卫星通信研究;

黄国策(1963-),男,陕西人,教授,主要从事卫星通信、通信网研究;

甄蜀春(1941-),男,四川人,教授,博士生导师,IEEE 高级会员,主要从事微波技术与微波智能检测研究。

2 Ka 频段卫星信道容量性能的研究

2.1 信道容量

对于具有加性白噪声(AWGN)的连续信道,可由 Shannon 定义的信道每单位带宽容量来表示 $\frac{S}{N}$ 。

$$\frac{S}{N} = 10\lg(2^{C/B} - 1) \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

超过一固定值 x 的概率分布函数为

$$\text{Prob}\left\{\frac{C}{B} \leq x\right\} = \text{Prob}\left\{\frac{S}{N} \leq 10\lg(2^x - 1)\right\} \quad (5)$$

由于传播衰落影响,式(5)中 S/N 是一个依赖于衰减过程特性和类型的随机变量,这意味着信道容量也是一个随机变量。在出现雨衰的情况下,接收信号的信噪比(S/N)为

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \left(\frac{S}{N}\right)_{t,c} - A \quad (\text{dBW}) \quad (6)$$

式(6)中, $\left(\frac{S}{N}\right)_{t,c}$ 是晴天条件下的信噪比, A 是链路中的整个雨衰。

将式(6)代入式(5)中,得

$$\text{Prob}\left\{\frac{C}{B} \leq x\right\} = \text{Prob}\left\{A \geq \frac{S}{N_{t,c}} - 10\lg(2^x - 1)\right\} = \text{Prob}\{A \geq \gamma\} \quad (7)$$

式(7)中, $\gamma = S/N_{t,c} - 10\lg(2^x - 1)$

$$\text{由式(3)得: } F_A(x) = \text{Prob}(A \geq x) = \int_x^\infty P_A(u) du \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得:

$$F_{C/B}(x) = \text{Prob}\left(\frac{C}{B} \leq x\right) = Q(\lambda) \quad (9)$$

$$\text{式(9)中, } \lambda = \frac{\ln\left[\frac{S}{N_{t,c}} - 10\lg(2^x - 1)\right] - m}{\sigma}。$$

文献[5]中,也对 $F_{C/B}(x)$ 进行了推导,其结果为: $F_{C/B}(x) = Q\left(\frac{1}{2}\lambda^2\right)$ 。经过本文的推导,文献[5]的结果是不对的。

在 $m = -2.68$, $\sigma = 1.64$ 时,对于不同信噪比条件,在出现雨衰时,其信道容量的概率分布函数如图 1 所示。

图 1 中,实线表示降雨下的信道容量值,点划线表示由 Shannon 公式得到的相应自由条件下信道容量值。通过比较,降雨条件下信道容量接近自由条件下信道容量,而信道容量呈急速的下降只发生在很小的概率范围内($F < 0.05$)。

2.2 误码率

卫星通信系统的另一个性能指标是误码率(BER)。对于大多数调制系统而言,当一个数字系统仅仅是一个加性高斯白噪声系统时,系统的误码率可表示成信噪比 E_b/N_0 的函数。例如对于数字卫星常用的 MPSK 调制方案,在误码率 $P_e < 10^{-3}$ 情况下, MPSK 调制的误码率 P_e 可以近似表示为^[10]

$$P_e = 2Q\left[\left(\sin \frac{\pi}{M}\right) \sqrt{\frac{2E_b(\log_2 M)}{N_0}}\right] \quad (10)$$

误码率与信噪比关系可表示为

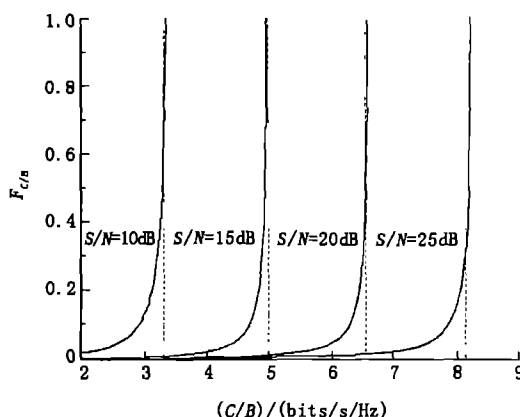


图 1 雨衰条件下信道容量的概率分布函数

$$\frac{S}{N} = f^{-1}(P_e) \quad (11)$$

在出现衰落时的概率分布函数为

$$F_{\text{BER}}(x) = P(\text{BER} > x) = P\left(\frac{S}{N} \leq f^{-1}(P_e)\right) \quad (12)$$

$$F_{\text{BER}}(x) = \int_{\frac{S}{N_{t,c}} f^{-1}(P_e)}^{\infty} P_A(u) du = Q(\beta) \quad (13)$$

$$\text{式(13)中, } \beta = \frac{\ln\left[\frac{S}{N_{t,c}} - 10\lg(f^{-1}(P_e))\right] - m}{\sigma}。$$

在 $m = -2.68$ 、 $\sigma = 1.64$ 、信噪比为 25 dB 时,各种不同调制方式,系统不可用度与误码率之间关系如图 2 所示。对于典型的 BER 门限极限($10^{-3} \sim 10^{-5}$),根据系统不同的调制方案,例如 BPSK 和 QPSK 调制,系统不可用度位于 0.01% 与 0.1% 之间。

3 结论

1) 从 Shannon 公式出发,分析了雨衰条件下信道容量的性能,并针对不同的信噪比,与 Shannon 公式所得到的理想信道容量进行了对比,发现在降雨条件下信道容量接近自由条件下信道容量,而信道容量呈急速的下降只发生在很小的概率范围内($F < 0.05$);

2) 以 MPSK 调制为例,以系统容量为出发点,进一步研究了系统不可用度与误码率的关系;

3) 纠正了文献[5]中的一些理论分析错误。

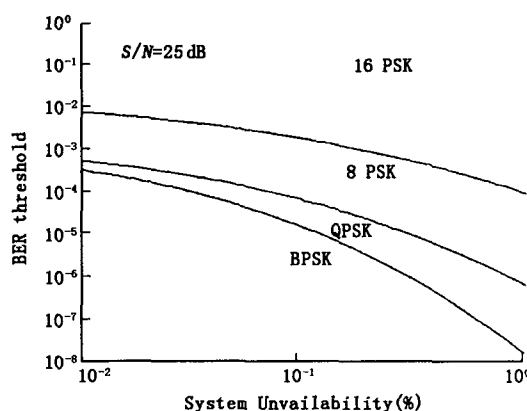


图 2 系统不可用度与误码率关系

参考文献:

- [1] Gargione F, Iida T, Vatalaro F. Services Technologies and Systems at Ka Band and Beyond - A Survey[J]. IEEE J Sel AREAS COM, 1999, 17(2): 133 - 144.
- [2] Evans J V. Proposed U S Global Satellite Operating at Ka - band[J]. IEEE Aerospace Conference, 1998, 4(3): 525 - 537.
- [3] Karasawa Y, Maekawa Y. Ka - band Earth - Space Propagation Research in Japan[J]. IEEE, 1997, 85(6): 821 - 842.
- [4] Filip M, Vilar E. Optimum Utilization of The Channel Capacity of A Satellite Link in The Presence of Amplitude Scintillation and Rain Attenuation[J]. IEEE Trans on Commu, 1990, 38(11): 1958 - 1965.
- [5] Karimi K, Aalo V. A Study of Satellite Channel Utilization in The Presence of Rain Attenuation in Florida[J]. IEEE Trans, 1998, 17(2): 196 - 200.
- [6] Gremont B, Filip M, Gallois P. Comparative Analysis and Performance of Two Predictive Fade Detection Schemes for Ka - band Fade countermeasures[J]. IEEE J. Sel. AREAS COM, 1999, 17(2): 180 - 192.
- [7] 刘阿娜, 郑春杰, 谢德芳. 抗雨衰的收缩码方案[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 34 - 37.
- [8] 谢德芳, 翁木云, 郭兴阳. Ka 频段卫星上行链路开环功率控制算法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(1): 39 - 42.
- [9] 张更新, 刘爱军. Dennis Roddy Satewite Communication[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [10] 徐平平, 宋铁成. Bernard Sklar Digital Communications Fundamentals and Application[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

(编辑: 门向生)

An Analysis of Satellite Channel Capacity for Performance under Conditions of Rain Attenuation

(下转第 59 页)