

流星突发信道的 Matlab 模拟

王栋良, 秦建存

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 流星余迹信道是一种典型的突发无线超视距信道, 对流星突发通信系统的设计方案, 使用模拟信道进行分析比较, 有着简易、经济的优势。基于公认的流星突发信道的数学模型, 通过合理假设, 推导出适合建立计算机模型的数学表达式, 由此编写 Matlab 程序, 选取典型信道参数, 实现了对流星突发信道的计算机模拟。

关键词: 流星余迹通信; Matlab; 信道模拟

中图分类号: TN911.22 文献标识码: A 文章编号: 1003-3114(2007)05-17-3

Simulation of Meteor Burst Channel with Matlab

WANG Dong-liang, QIN Jian-cun

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

Abstract: Meteor trail channel is a typical wireless intermittent NLOS channel. For the design of meteor burst communication systems, using simulated channel for analysis and comparison is both simple and economic. Based on the well accepted mathematic model of meteor burst channel, reasonable assumptions are set, and expressions suitable for implementation with computer are deduced. Then the program is written in Matlab and the parameters of the channel are chosen, and the simulation of meteor burst channel is realized in the computer.

Key words: meteor burst communication; Matlab; simulation

0 引言

某流星余迹通信系统的设计, 尤其是通信协议的设计, 要求进行大量的有信道的链路测试。由于流星余迹通信特有的远距离、大功率等特点, 使得这些试验全部在实际信道中进行的成本不可接受。因此, 相当一部分的试验工作要在模拟信道中进行。本文即基于流星余迹信道的一般数学模型, 推导其便于计算机实现的表达式, 模拟流星余迹信道的幅度-时间变化规律。在理论研究当中, 由于不同研究侧重点的需要, 流星余迹通信链路的数学模型有所不同, 但是其传输特性和主要参数之间的关系是基本公认的, 以下给出的是北半球中纬度地区的典型链路的传输方程, 同其他模型的区别主要在一些常数的选择。

欠密度流星余迹通信链路的数学模型如式(1)所示:

$$\frac{P_{R(t)}}{P_T} = \frac{1}{32\pi^4} \left( \frac{\mu_0 e^2}{4m} \right) \frac{2\lambda^3}{R_1 R_2 (R_1 + R_2)} \frac{G_R G_T q^2 \sin\alpha}{1 - \cos^2\beta \sin^2\phi} \exp \left[ - \frac{32\pi^2 dt}{\lambda^2 \sec^2\phi} \right] \quad (1)$$

收稿日期: 2007-01-17

作者简介: 王栋良(1980-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 流星余迹通信。

过密度流星余迹通信链路的数学模型如式(2)所示:

$$\frac{P_{R(t)}}{P_T} = \frac{G_T G_R}{32\pi^4} \left( \frac{\mu_0 e^2}{4m} \right)^{1/2} \frac{\lambda^3 \sin^2\alpha q^{1/2}}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (1 - \cos^2\beta \sin^2\phi)} \left[ dt \ln \left( \frac{\mu_0 e^2 q \lambda^2 \sec^2\phi}{16n\pi^3 dt} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中,  $P_R$  为接收功率;  $P_T$  为发射机功率;  $\frac{\mu_0 e^2}{4m} = 0.885 \times 10^{-14}$ ;  $\mu_0$  为自由空间的渗透性;  $e$  为单个电子电荷;  $m$  为单个电子质量;  $\lambda$  为波长;  $R_1/R_2$  为流星余迹到发射机和接收机之间的距离;  $G_R$ 、 $G_T$  为接收和发射天线的增益;  $q$  为电子线密度;  $\alpha$  入射波电子矢量与流星路径间的夹角;  $2\phi$  (前向散射角) 入射波与散射波间的夹角;  $\beta$  为流星余迹圆柱体的轴与包含传输路径面之间的夹角;  $d$  为流星柱体的扩散常数 (由试验确定为 8 m/s)。流星的过密度  $q > 10^{14}$  和欠密度的区别由  $q$  值决定, 流星余迹的电子线密度电子/m 时为过密度余迹, 否则为欠密度余迹。综合以上数学模型, 可以将链路的传输损耗分为不随时间  $t$  变化的固定部分和随时间  $t$  变化的时变部分。

1 传输方程的非时变部分

首先, 假设  $G_T G_R = 1$ , 天线增益被考虑成各向同性的。其次, 余迹定位出现在第一费涅尔区。仅当

入射和反射到流星的电波线为直角时, 即  $2\phi \approx 90^\circ$ , 余迹提供反射。同样, 假定流星入射的方向是随机的,  $\beta$  值均匀分布导致  $\cos\beta$  的平均值为  $2/\pi$ 。假定用水平极化传输, 即  $\alpha=90^\circ$ 。

基于以上假设, 传输方程式(1)简化为:

$$\frac{P_{R(0)}}{P_T} = \frac{1}{32\pi^4} \left( \frac{\mu_0 e^2}{4m} \right)^2 \frac{2\lambda^3}{R_1 R_2 (R_1 + R_2)} \frac{q^2}{1 - \left( \frac{2}{\pi} \right)^2 \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (3)$$

令  $\lambda = c/f$ ,  $f$  为传输频率, 则

$$\frac{P_{R(0)}}{P_T} = \frac{1}{16\pi^4} \left( \frac{\mu_0 e^2}{4m} \right)^2 \frac{C^3}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) f^3} \frac{q^2}{1 - \frac{2}{\pi^2}} \quad (4)$$

式中, 表达式  $\frac{1}{16\pi^4} \left( \frac{\mu_0 e^2}{4m} \right)^2 \frac{C^3}{1 - \frac{2}{\pi^2}}$  是一个常数, 等于

$17.024 \times 10^{-7}$ 。

这样, 式(4)变为:

$$\frac{P_{R(0)}}{P_T} = 17.024 \times 10^{-7} \frac{q^2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) f^3} \quad (5)$$

可以看到, 欠密度流星余迹通信链路的传输损耗与电子线密度的平方成正比, 与站点到流星距离的立方成反比, 与传输频率的立方成反比。

采用同样的假设分析过密度余迹传输方程的固定部分可得:

$$\frac{P_{R(0)}}{P_T} = 10.221 \times 10^{14} \frac{q^{1/2}}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) f^3} \quad (6)$$

可见, 过密度条件下, 流星余迹通信链路的传输损耗与电子线密度的平方根成反比, 与站点到流星距离的立方成反比, 与传输频率的立方成反比。注意到频率和几何结构对传输损耗的影响, 在欠密度和过密度情况下是相同的。

以上方程已经便于计算机模拟的实现, 其中  $q$  作为流星余迹的电子线密度, 是指指数随机分布的, 也就是说, 电子线密度每增加一个数量级, 相应流星出现的数量减少一个数量级。在计算机实现的时候, 考虑到分布的边界的界定困难, 和可利用流星大多存在于 1~2 个数量级中, 可以使用指数分布的产生函数通过数学运算来模拟。

在模拟中, 假设  $R_1 = R_2$ , 其通信站点间几何关系如图 1 所示。图中,  $h$  为流星出现的高度;  $R$  为站点到流星的距离;  $r$  为地球的半径; 两站点地球表面距离为  $L$ ,  $d_1$  为两站点直线距离的一半。

由以上几何关系可推导出:

$$d_1 = r \times \sin\left(\frac{L}{2r}\right); \quad (7)$$

$$R = \sqrt{r^2 \times \cos^2\left(\frac{L}{2r}\right) + h^2 + d_1^2} \quad (8)$$

在模拟中,  $d$ 、 $r$ 、 $h$  为可以设置的参数。

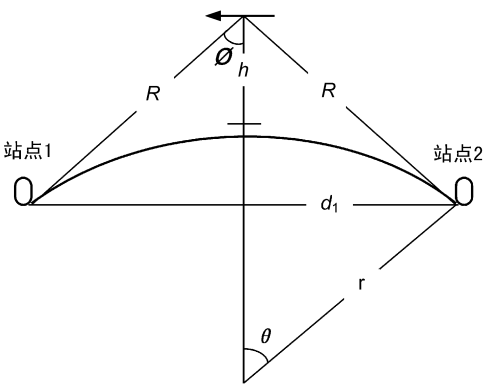


图 1 通信站点间几何关系

对于流星余迹通信系统使用的无线电频率  $f$ , 一般认为可以取 30~100 MHz。但是考虑到传输损耗与频率的立方成正比, 一般选取 30~50 MHz。

2 传输方程的时变部分

以下讨论 2 种传输方程的时变部分, 对于欠密度余迹, 其时变部分为:

$$A = \exp\left[-\frac{32\pi^2 dt}{\lambda^2 \sec^2 \phi}\right] \quad (9)$$

它描述了一个指数衰减, 时间常数为  $\tau = \frac{\lambda^2 \sec^2 \phi}{32\pi^2 d}$ 。可见  $\tau$  的变化依赖于  $\phi$  的变化, 在这里  $\phi$  是不能忽略的因素。由以上假设的几何关系, 可以推导出  $\sec \phi$  的表达式为:

$$\sec \phi = \frac{R}{h + r - \sqrt{r^2 - d_1^2}} \quad (10)$$

对于过密度余迹, 其时变部分为:

$$A = \left[ td \ln \left( \frac{\mu_0 e^2 q \lambda^2 \sec^2 \phi}{16m\pi^3 td} \right) \right]^{1/2} \quad (11)$$

它描述了一个对数响应, 时间常数为  $\tau' = \frac{\mu_0 e q \lambda^2 \sec^2 \phi}{16m\pi^3 d}$ 。由于  $\frac{\mu_0 e^2}{16m\pi^3 d}$  是一个常数, 过密余迹时间常数是频率  $\lambda$ 、前向散射角  $\phi$ 、电子线密度  $q$  的函数。对于欠密和过密余迹来说, 时间常数与频率和前向散射角之间的函数关系是相同的。在欠密条件下, 时间常数与电子密度无关。由于过密度余迹的电子线密度  $q$  是随时间变化的, 这就给时间常数的计算造成了困难。这里应用这样一个假设, 在欠密度余迹和过密度余迹的分界点, 也就是  $q = 1.014$  电子/m时, 欠密度余迹的时间常数和过密度余迹的时间常数是相同的, 这样过密度余迹的时间常数可以表示为:

$$\tau' = \frac{q}{10^{14}} \tau \quad (12)$$

通过以上假设和推导, 这个数学模型的参数都可以进行设置和计算, 已经便于计算机的模拟实现。

3 程序设计流程和优化

流星余迹信道的模拟程序的建立思路如下: 首先进行计算所需的常数的设定, 包括  $r$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $f$ 、欠密度传输常数和过密度传输常数。然后计算几何关系和各种基本非时变损耗, 包括距离损耗和频率损耗。由流星出现的分布情况产生  $q$  值, 和分界点  $q_0$  进行比较, 选择进行欠密度时间损耗计算和过密度时间损耗计算。

在程序设计过程中进行了以下优化:  
过密度余迹和欠密度余迹的衔接, 过密度余迹经过一定时间的扩散以后, 由于电子线密度的减小, 信道的传输特性开始服从欠密度传输规律。为了达到过密度时间损耗到欠密度时间损耗的平滑过渡, 首先计算电子线密度在分界点  $q_0$  时链路的损耗  $A_0$ , 当过密度损耗等于  $A_0$  时, 进行以  $A_0$  为基本损耗的欠密度时间损耗计算, 这样的计算是符合逻辑的。

欠密度时间常数的计算, 程序采用循环模式, 对于多个不同的  $q$  值的余迹, 计算其不同时间的链路损耗值。由于欠密度时间常数和流星的电子线密度无关, 所以没有必要对于每产生一个  $q$  值即进行一次欠密度时间常数计算, 在循环体之外进行计算即可, 由此产生的时间损耗写入文件当中, 当进行欠密度时间损耗的计算时, 只需要从文件读出相应时间的损耗值即可。

大向量的处理, 程序模拟的信道特性是以时间为变量的一系列损耗值, 在 Matlab 中, 很容易想到用一个向量来表示, 但是, 在进行计算的时候, 太大的向量会导致计算时间明显增加, 因此在进行程序设计

计时, 利用了 Matlab 的文件存取功能, 每计算一个损耗值, 即顺序写入文件当中, 待使用时将数据从文件当中读出, 这样的设计, 明显减少了 Matlab 程序的计算时间。Matlab 流星余迹通信链路信道模拟程序的流程如图 2 所示。

4 结束语

使用 Matlab 编程实现信道模拟后, 产生的信道特性如图 3 所示。可见, 程序很好地反映了流星余迹信道指数衰落和对数衰落的特性。本程序采用的参数为:  $D=900\text{ km}$ ;  $f=30\text{ MHz}$ ;  $h$  假设为  $100\text{ km}$ ;  $r$  为  $6\text{ 400 km}$ ;  $d=8\text{ m/s}$ 。计算所得的损耗的量级是和试验结论相符的。

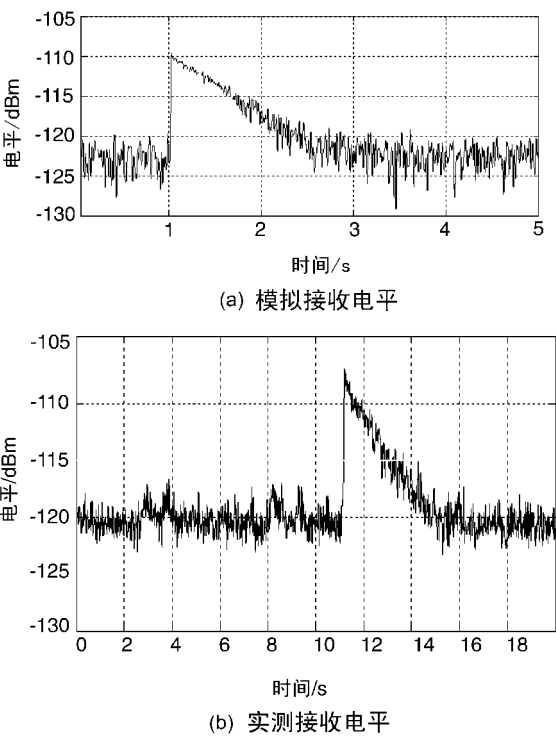


图 3 模拟波形和实测波形的比较

当  $q=4\times 10^{-13}$  时, 其峰值约为  $-109\text{ dBm}$  (考虑发射接收增益和信道噪声)。假设参数和实测试验条件存在一定差别, 但是模拟数据峰值和试验结论符合, 变化规律符合理论模型和试验数据, 可以在系统测试中应用。

参考文献

[ 1 ] SCHILLING D L. Meteor burst communications[ M ] . Canada: Wiley inter science, 1993.  
[ 2 ] 荀立军, 杨斌, 王伟, 等. 流星突发通信中的信道估计研究[ J ] . 无线电工程, 2004, 34( 11): 48—50.

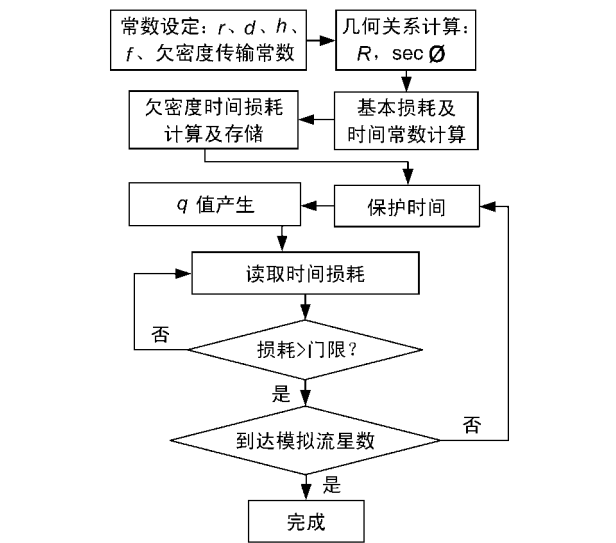


图 2 Matlab 流星余迹通信链路信道模拟程序流程