

流星余迹通信信道建模与性能仿真

张金平 韩娟娟 金力军

(西安电子科技大学 710071)

摘要 在已有经验数据和理论的基础上, 结合实际的通信情况, 利用通信、数理、几何、概率的知识建立了流星余迹通信信道的数学模型, 并且应用 C++ 程序模拟了该信道模型。利用该模型对流星余迹通信信道的特性进行了仿真, 并对流星余迹通信的几项重要指标(如流星余迹平均通信时间、余迹的到达间隔、多径干扰的概率等)做了统计, 统计结果表明所建立的信道模型与实际的信道特性基本一致。该信道模型被应用于流星余迹通信系统的软件开发过程中, 以模拟实际的流星余迹通信链路。

关键词 流星余迹 电子线密度 突发长度 到达间隔 热点区 过密类 欠密类

0 引言

地球的大气层被数目众多的类似灰尘的流星颗粒轰击而电离, 在距地球 80 ~ 120km 的高空产生短持续时间的电离气体柱谓之余迹。当满足一定条件的两地利用余迹对电波的散射建立通信链路——这就是流星余迹通信。流星余迹通信因其特定的信道特性, 具有抗截获、干扰, 成本低的优点, 适用于全天候, 无人职守, 2000km 以内的突发通信; 它的缺点是数据通过率低和非实时性。科研人员已对流星余迹通信信道特性做了相当多的研究, 由于其中涉及到的物理现象是相当复杂和多变的, 所以对每一个独立的突发通信过程做定性分析是不可能的, 唯一可行的方法是对众多的通信过程进行统计分析。本文基于已被广泛接受的理论和数据的基础上, 推导出一系列的公式, 利用这些公式对流星余迹通信信道进行建模。

1 流星余迹通信的特性及参数

1.1 流星余迹的分类

流星余迹可以被划分为两类: 过密类余迹和欠密类余迹。电子线密度大于 10^{14} 的是过密类余迹, 其反射信号先是逐步升到峰值, 然后逐步衰减(见图 1)^[3]; 电子线密度小于 10^{14} 的

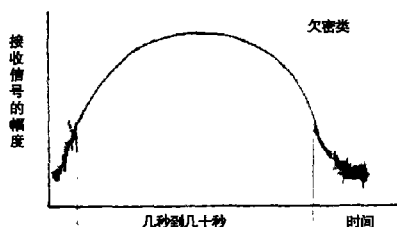


图 1 过密类余迹

是欠密类余迹, 其反射信号在很快的时间内达到峰值, 然后开始参数为时常数的指数衰减(见图 2)^[3]。过密类余迹的持续时间长于欠密类余迹的持续时间。

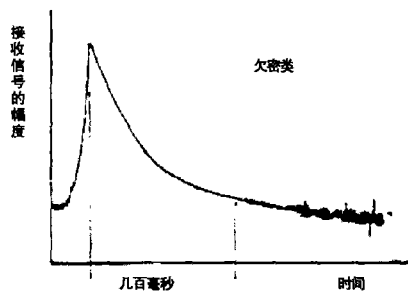


图 2 欠密类余迹

进入到大气层的流星数目与其大小是成反比的, 而余迹的电子线密度是与流星大小成正比的, 显然, 出现欠密类余迹的概率大, 流星余迹通信主要利用欠密类余迹。

1.2 流星余迹通信的原理

图 3 中, φ 是从反射点到发射站和接收站连线夹角的一半; 收发两站之间的距离为 2000km 以内;

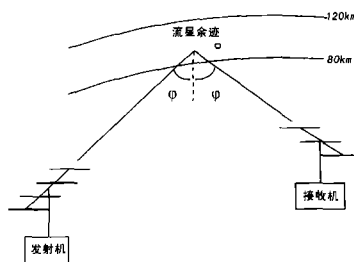


图 3 流星余迹通信的原理

余迹出现的高度为 80 ~ 120km。

1.3 流星余迹通信的主要参数

①突发长度:流星通信或是数据突发传输的时间。

②等待时间:两次可用于通信的流星余迹出现的时间间隔。

③占空因子:平均突发长度与平均等待时间之比。

占空因子的计算^[2]:

反射概率:

$$p = \frac{2L[(\xi^2 - 1)(\xi^2 - \eta^2) - \xi^2 \eta^2 / D^2]^{1/2}}{\pi D(\xi^2 - \eta^2)(\xi^2 - 1)^2} \quad (1)$$

$$\text{其中: } \xi = \frac{R_T + R_R}{2D}$$

$$\eta = \frac{R_T - R_R}{2D}$$

$$R_T = \sqrt{(x + D)^2 + y^2 + h^2}$$

$$R_R = \sqrt{(x - D)^2 + y^2 + h^2}$$

$$h = 124 - 17 \log f$$

式中 x, y 为以收发站大圆路径中点为坐标原点的坐标值; R_T 是反射点距发射站的距离; R_R 是反射点距接收站的距离; $2D$ 为收发站之间的距离; L 为余迹的平均长度; h 是流星余迹的发生高度(km), f 的单位为 MHz。

占空因子值为:

$$\eta_0 = \sqrt{(P_T(\frac{\lambda}{4\pi D})/P_L)2\pi \times R_e C_0 \times \int_{D_0} \sqrt{G_T G_R p dA} \times \tau_0} \quad (2)$$

式中 C_0 代表流星余迹的年平均强度($160/m^3 s$); D_0 代表流星出现高度的一个平面域; $R_e = 2.8178 \times 10^{-15}$ 为电子的半径; P_T 是发射机的发射功率; G_T 是发射机的天线增益(12dBi); G_R 是接收机的天线增益(12dBi); λ 是发射信号的波长; P_L 为接收机的灵敏度; τ_0 为基准的持续时间。

④工作频率:流星通信系统一般工作于 30 ~ 50MHz 的 VHF 频段。

⑤欠密类余迹的接收功率的衰减因子:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\cos^2 \varphi} \quad (3)$$

其中: $\tau_0 = \frac{\lambda^2}{32 \times \pi^2 \times d}$; $\log d = 0.067h - 5.6$; d 是扩散因子(m^2/s)。

⑥到达间隔:两次流星余迹出现的时间间隔;服从参数为平均到达间隔的指数分布。

2 流星余迹通信信道模型的建立

首先设定一些信道建模的前题条件:通信站双方通信距离为 400 ~ 2000km;通信的工作频率为 30 ~ 50MHz;发射机的功率为 100W, 200W, 300W 或 1000W;每一时刻天线的照射区内仅有一颗流星到达;接收机的接收灵敏度相对于 8dB 信噪比为 -120dBm。

基于以上假设的条件,对以下几个主要的信道参数进行了分析、建模、仿真。

2.1 天线的照射空域

假设天线为定向八木天线,其主瓣的半功率宽度为 30 度。对于不同的通信距离,天线的仰角不同,天线的照射空域的计算公式不同,图 4 中给出了一些变量和反射几何图关系。

1)当天线的仰角大于等于 15°时,天线的照射空域中心左侧的半径小于等于右侧的半径为:

$$\begin{aligned} r &= r1 - r2/r3 \\ r2 &= [h + 6380 * \cos(2 * \pi * D/6380)] \\ r3 &= \tan[\pi/12 + \omega] \end{aligned} \quad (4)$$

2)当天线的仰角小于 15°时,天线的照射空域中心右侧的半径小于等于左侧的半径为:

$$\begin{aligned} r &= r1/r2 \\ r1 &= [h - [6380/\cos(2 * \pi * D/6380)]] \\ r2 &= \tan(2 * \pi * D/6380) \end{aligned} \quad (5)$$

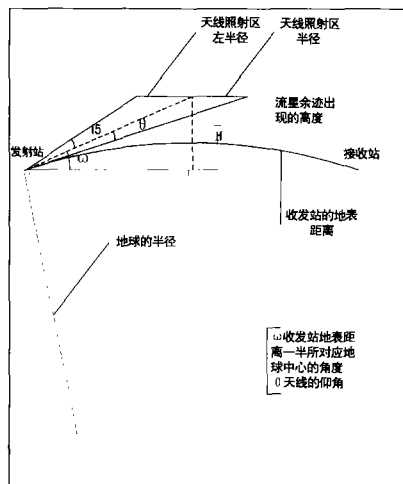


图4 天线照射区域的计算几何图形

2.2 流星余迹的电子线密度

从统计数据来看,电子线密度每增加一个量级,它出现概率就减为原来的十分之一。所以依据概率

密度函数与均匀分布之间的关系,用式(6)逼近出现流星余迹的电子线密度值:

$$e = 1.0 \times 10^{12} / 1 - A_{line} \quad (6)$$

e 为电子线密度, A_{line} 为 0-1 之间的随机数,依据这个公式所产生的电子线密度值都是大于 1.0×10^{12} 的。

2.3 流星余迹的到达间隔^[1~3]

$$T = \tau_0 / \eta_0 \cos^2 \varphi \quad (7)$$

式中 τ_0 为平均持续时间, η_0 为占空因子, T 为平均到达间隔。

流星的到达间隔服从参数为 T 的指数分布^[2]:

$$p = \frac{1}{T} \exp(-\frac{t}{T}) \quad (8)$$

依据概率密度与均匀分布之间的关系:

$$x = -T \times \ln(1 - A) \quad (9)$$

式(9)中 x 为下一颗流星到达的时间间隔; A 为 0-1 之间均匀分布的一个随机数。

2.4 流星余迹的持续时间^[1,3]

$$P_{R\lambda} = p1/p2/p3$$

$$p1 = P_T G_T G_R q^2 R_e^2 \lambda^3 \sin^2 \alpha \quad (10)$$

$$p2 = 16\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R)$$

$$p3 = (1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \beta)$$

$$P_{R\text{过}} = p4/p5/p3$$

$$p4 = P_T G_T G_R \lambda^3 \sin^2 \alpha \quad (11)$$

$$p5 = 32\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R)$$

$$P_{RR\lambda} = \frac{p1}{p2p3} p6p7$$

$$p6 = \exp(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \varphi}) \quad (12)$$

$$p7 = \exp(-\frac{32\pi^2 Dt}{\lambda^2 \sec^2 \varphi})$$

$$P_{RR\text{过}} = \frac{p4}{p5p3} \left\{ \frac{4Dt}{\sec^2 \varphi} p8 \right\}^{1/2} \quad (13)$$

$$p8 = \ln(\frac{R_e q \lambda^2 \sec^2 \varphi}{4\pi^2 Dt})$$

式(10)~式(13)分别给出了接收机接收到欠密类,过密类余迹所反射信号的初始接收功率和接收功率的时间函数。其中 α 是反射时与偏面波的转动有关的参数,在模拟中取 $\alpha = 90^\circ$; β 是电波的传送面与流星余迹中心轴所夹的角,在模拟中取 $\beta = 90^\circ$; r_0 是流星余迹生成初期的半径,为简便,假设 $r_0 = 0$ 。

当接收功率的初始值大于接收数据所需信噪比时,一次流星余迹通信开始,从这一时刻到接收功率

的时间函数值小于接收数据所需信噪比时刻,这段时间为流星余迹的持续时间或通信时间,即突发长度。

2.5 流星余迹通信中的多径问题

在流星余迹通信中,由于单颗流星受环境的影响而产生多径干扰的概率是很小的,这种情况在信道的建模中不予考虑。这里主要考虑了由于两颗以上的流星同时存在而产生的多径问题。假设在天线的照射空域内的某一点有一颗流星余迹正用于通信,在其持续时间内有另一颗流星达到,并可以进行通信,那么这时候就会产生多径干扰。多径延迟的计算应该是信号经由两个不同的反射点的传播路径差与传播速率的商值。计算公式如下:

多径时延的计算:

$$t = (R_{T\text{new}} + R_{R\text{new}} - R_{T\text{old}} - R_{R\text{old}}) / 3 \times 10^8 \quad (14)$$

式中 $R_{T\text{new}}$, $R_{R\text{new}}$ 是新产生的反射点距收发站的距离和, $R_{T\text{old}}$, $R_{R\text{old}}$ 是原反射点距收发站的距离和。信号的传播速率是 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

3 信道仿真的结果

按着第三部分中所陈述的方法,用 borland c++ 5.0 编写了流星余迹通信信道模型程序,经过多次计算,得出了部分统计结果,并与线路实测的流星余迹通信信道特性做了比较,仿真的结果与实际情况是吻合的。

3.1 对天线照射空域的仿真

表 1 天线照射空域的半径的部分数据(km)

收发站距离	天线照射区半径
400	84.60
600	135.68
700	162.48
800	189.25
1000	241.07
1200	288.63
1400	329.79

理论上讲,天线中心区域的反射效率比较高,越向边缘反射效率越低,为了仿真最坏的多径干扰,这里假定天线照射区域内的反射效率都为 100%。

3.2 对不同的电子线密度的出现概率的仿真

对 3 个不同的通信距离分别作了 900 分钟模拟,不同电子线密度流星出现的颗数的统计平均值列于表 2。可以看出,电子线密度每降低一个数量级,则这个数量级的流星的出现概率是原来的 10

倍。表3列出是实测的一天之内电子线密度与出现颗数之间的关系^{[1][3]}。

表2 在不同距离,不同电子线密度的流星数

(km)	10^{15} 以上	10^{14}	10^{13}	10^{12}
1000	0.73	6.73	65.07	648.07
400	0.47	1.73	22.40	192.33
800	0.86	7.14	76.21	743.57

表3 实测统计的出现不同电子线密度的流星颗数

电子线密度	10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{12}
流星颗数	10^7	10^8	10^9	10^{10}

3.3 对流星余迹通信的持续时间的模拟

每做一次统计时间为60分钟的模拟,可以产生多次欠密类通信和几次过密类通信,从模拟所获得的数据中可以统计出,绝大多数欠密类余迹的通信持续时间在几百毫秒以内,过密类余迹的通信持续时间为几百毫秒到几秒。

欠密类的情况如图5所示,过密类的情况如图6所示,与图1、图2是吻合的。

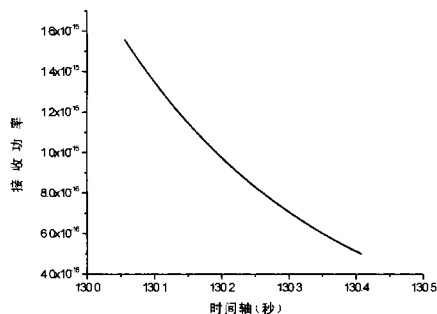


图5 欠密类

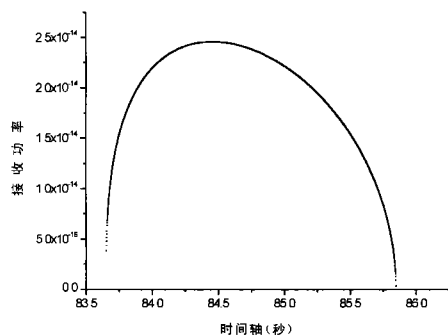


图6 过密类

3.4 对流星余迹的到达间隔的模拟

对于给定的平均到达间隔,仿真了一千个到达时间间隔,画出 P_e-t 曲线(见图7), P_e 为到达间隔小于某一时刻 t 的概率。概率曲线为接近于参数为10的指数分布。

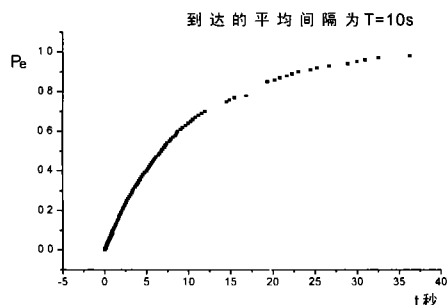


图7 流星余迹到达间隔的概率曲线

3.5 对流星余迹通信中多径干扰的模拟

如果在一次流星余迹通信过程中,另一颗流星到达了,也就是说在天线的照射空域内同时存在两颗流星,并且都可用于通信时,会出现多径干扰。

从仿真统计数据可见,出现两颗流星的概率是1%~3%,出现多颗流星的概率是很小的。另外,在传输速率为24kbps的时候,多径迟延在3个码元以内的概率1%~3%,在3个码元以上的概率不到1‰,这与实测的统计情况是吻合的^[5]。

表4列出了,4个不同通信距离通信站4800分钟的通信过程中的流星余迹出现的颗数,以及多径数和迟延超过3个码元的多径数的平均值。

表4 不同的统计过程中多径的情况

通信站的距离(km)	400	700	1000	1400
可用余迹总数	224.60	521.67	722.13	801.10
出现多径次数	1.81	7.53	12.47	14.80
迟延超过3码元的次数	0.00	0.22	1.67	3.10

4 结 论

在流星信道的建模过程中,利用已有的基本理论,并应用几何与概率理论推导出一些简单的公式,用这些公式模拟流星余迹的各种物理特性。从模拟的结果与实验所获得的结果相比较的情况可以看出,这个流星余迹通信信道的建模是合理和有效的。

参 考 文 献

- 1 福田 明.流星バ スト通信.大板:コロナ社,1996
- 2 Prof.K.Ohno, T.Shiyama, Ph.D., and Prof.H.Mine. Optimal Channel Assignment in a Packet Switching Network with a Conflict - Free Multiple - Access Scheme. IEE PROCEEDINGS. Vol.132. Pt. F, No.6, 1985.10
- 3 Schanker, Jacob Z. Meteor Burst Communications. Library of Congress Cataloging - in - Publication Data,1990
- 4 毛用才,胡奇英.随机过程.西安:电子科技大学出版社,2000
- 5 群星.流星余迹瞬间通信系统.西安电子科技大学学报,1976,(1)