

流星突发链路建模与性能预测研究

李志勇, 李文铎, 赵彦惠

(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 研究了流星突发链路(MBC)建模与性能预测的算法, 该算法以链路的站址、发射功率、使用频率、极化方式、收发天线方向图、接收机门限和调制方式为已知条件, 通过数值积分方法可以预测全年任意时段 MBC 设备可用流星数目。给出了 2 条 MBC 链路的实测数据, 对实测数据和预测数据进行了对比。

关键词 流星突发链路; 可用流星数; 信道建模; 性能预测

中图分类号 TN926+.5

文献标识码 A

文章编号 1003-3106(2008)02-0041-03

Meteor-burst Modeling and Performance Prediction

LI Zhi-yong, LI Wen-duo, ZHAO Yan-hui

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

Abstract An algorithm of modeling and performance prediction for meteor-burst link is developed. With this algorithm, the number of usable meteors for the MBC equipment can be calculated from such data as transmit and receive sites, employed power, frequency, polarization, radiation patterns, receiver threshold and modulated mode. Two MBC on-the-spot test data are introduced and compared with the predicted data.

Key words meteor-burst link; usable meteor; channel modeling; performance prediction

0 引言

每天有超过 10^{12} 颗流星进入地球大气层, 如果流星质量和速度足够大, 那么就可能在 80 ~ 120 km 的高度上产生一条充分电离的尾迹。流星尾迹对电波传播有前向散射作用, 利用这种散射作用可在某些频段上实现超视距传输, 这就是流星突发通信(Meteor Burst Communication, MBC)的基本原理。

流星到达是一种随机事件, 那么, 是否可以对流星到达频次进行预报? 是否可以根据流星到达频次进一步估计 MBC 链路的平均等待时间和信息通过量? 这个问题即是 MBC 链路建模需要解答的问题。要回答这个问题, 必须首先考虑下面 2 个因素^[1, 2]。

进入地球大气层的流星通常被区分为偶发流星(Sporadic Meteor)和流星雨(Shower)两大类。流星雨的出现可以大大增强 MBC 信号, 但这种自然现象非常罕见, 因此 MBC 电路设计的主要依据还是偶发流星的出现频度。要获知偶发流星在不同方位、不同时段和不同季节出现的统计规律, 必须使用流星探测雷达进行经年的长期观测才有可能建立起完备的数据库, 这是一项费时、耗资的基础工作。

除此之外, 流星探测雷达的设备能力一般要优于 MBC 设备能力, 这样在天球的某个方位上, 流星

探测雷达可以“看”到的尾迹, MBC 设备可能“看”不到。因此, 在 MBC 链路建模过程中不仅需要流星探测雷达观测的统计数据, 还需要将 MBC 设备参数和站址参数、对通时段参数都考虑进来^[3]。

1 MBC 链路建模概述

MBC 链路建模的计算过程可以分为如下 3 步, 这个方法又称为体密度积分法。

① 在已知收发天线的方向图的情况下, 给定一个收发天线增益积的下限, 就可以确定收发天线的“共同照亮区”。将收发天线的共同照亮区按经、纬和高度划分为立体网格, 例如, 每个小网格块高度(厚度)为 2 km, 面积为 1000 m^2 。由于“共同照亮区”以外的区域天线增益积太低, 即使有流星出现 MBC 链路也不可能“看”到, 因此在下面的计算中只要考虑“共同照亮区”就可以了。

② 假设电波散射点位于某个小网格区, 确定在某个时间段内收站在这个小网格区可能“看”到的流星数目, 也就是链路可用流星的微分表示。显然这个微分量与 MBC 设备参数、天线增益和站址参数都有关。

③ 一旦得到一个时段内 MBC 链路可用流星的

收稿日期: 2005-09-12

微分表示, 通过对这些立体网格单元进行积分就可以得到全部可用流星数目。

如果得到了一个时段内的可用流星数目, 很自然就得到了平均等待时间。平均信息通过量的计算稍微复杂, 现在分析其计算过程。

在每个微分网格单元内可用的流星数已经计算出来, 这些流星产生的电子线密度是不同的, 电子线密度大的尾迹可以支持的互通时间显然比电子线密度小的尾迹支持的互通时间长。借助一些经典的等离子体散射模型, 可以根据电子线密度推出散射点的散射损耗。随着尾迹中等离子体的扩散, 尾迹电子线密度逐渐降低, 散射损耗逐步变大直至尾迹不可用。除了等离子体散射模型, 研究人员还研究了大气中等离子体的扩散过程并提出了若干尾迹生成/扩散模型。这些散射模型和尾迹生成/扩散模型的计算可参阅文献[4]。

至此可以得出, 如果以每个立体网格单元中流星的速度和质量为已知量, 使用等离子体生成模型可以得到尾迹初始电子线密度; 借助等离子体散射模型可以确定 MBC 链路可用的最小电子线密度; 根据等离子扩散模型可以计算出该尾迹从生成直至扩散至电子线密度小于某个下限(MBC 不再可用)的维持时间, 这个维持时间就是该尾迹的可用时间; 最后, 根据可用时间和调解速率就可以计算出每条尾迹可通过的信息量。对所有尾迹进行积分, 就能得到一段时间内链路全部的信息通过量。

2 MBC 链路建模理论分析

2.1 链路可用流星的微分表示

假设流星相对于地球的速度为 $V=v\hat{v}_m$, 其中速率大小为 v ; \hat{v}_m 为单位方向矢量。在时间 t 到 $t+dt$ 之内、流星速率在 v 到 $v+dv$ 之间、流星质量在 m 到 $m+dm$ 之间、流星方向在立体角 $d\Omega$ 内并通过某个单元面 dS 的流星数目(流星通量)可以表示为:

$$dN=c_n m^{-s} p_V(v, \hat{v}_m) dm dv dS d\Omega dt. \tag{1}$$

式中, dN 为全部流星数目 N 对变元 v 、 m 、 Ω 、 S 和 t 的微分; c_n 为比例常数; m 为流星质量; $p_V(v, \hat{v}_m)$ 为以速率和方向 (v, \hat{v}_m) 为参数的流星概率密度函数; s 为在某个方向 \hat{v}_m 上的流星质量指数; v 为流星的速率。

$p_V(v, \hat{v}_m)$ 是一个概率密度函数, 它满足:

$$\int_{\Omega_{4\pi}} \int_{v_l}^{v_h} p_V(v, \hat{v}_m) dv d\Omega = 1. \tag{2}$$

于是, 在 \hat{v}_m 方向上流星的概率密度函数为:

$$p_{\hat{v}_m}(\hat{v}_m) = \int_{v_l}^{v_h} p_V(v, \hat{v}_m) dv. \tag{3}$$

进入地球大气层的流星的速率在 $v_h \sim v_l$ 之间, v_h 约为 72 km/s; v_l 约为 12 km/s。

对式(1)中的 v 积分, 可以得到某个特定方向 \hat{v}_m 上的流星数目为:

$$\Phi(\hat{v}_m) = c_n m^{-s} p_{\hat{v}_m}(\hat{v}_m) dm dS d\Omega dt. \tag{4}$$

对式(4)中的 m 积分, 在某个特定方向 \hat{v}_m 上、质量大于 m_0 的流星数目可以表示为:

$$\Theta(m_0, \hat{v}_m) = c_n p_{\hat{v}_m}(\hat{v}_m) \int_{m_0}^{+\infty} m^{-s} dm = (s-1) c_n p_{\hat{v}_m}(\hat{v}_m) m_0^{1-s}. \tag{5}$$

式(5)表示了在 dt 时间内观察到的通过单元面 dS 、方向为 \hat{v}_m 、在立体角 $d\Omega$ 内的流星数目。当然, 流星数目的这种微分形式的表示首先要假定流星的到达是随机平稳的。

如果要使用式(5)计算链路的 $\Theta(m_0, \hat{v}_m)$, 必须确定 $p_{\hat{v}_m}(\hat{v}_m)$ 和 m_0 。其中, $p_{\hat{v}_m}(\hat{v}_m)$ 可以根据流星探测雷达实测的数据来反推: 流星探测雷达能探测到的最小流星质量 m_{0r} 是已知的, 不同方向 \hat{v}_m 上的 $\Theta(m_0, \hat{v}_m)$ 也已实测出来, 因此根据式(5)可以反推出 $c_n p_{\hat{v}_m}(\hat{v}_m)$ 。显然, 并不需要单独计算出比例系数 c_n 。

MBC 链路能够使用的最小流星质量 m_{0l} 的计算非常复杂。这是由于在不同的散射点(也就是不同的立体网格单元), 链路可用的最小流星质量是不同的, 它必须根据站址参数和 MBC 设备参数来计算, 现简述其计算过程。

根据研究人员提出的经典散射模型, 如果已知尾迹中的电子线密度以及收波束、发波束和尾迹三者的方向关系, 那么可以确定散射损耗。反之, 如果散射点确定, 该条电波传播路径允许的最大散射损耗就确定了, 根据这个散射损耗可以反推出允许的最小电子线密度。进一步根据等离子生成模型, 可以计算出产生这个最小电子线密度所需的最小流星质量 m_{0l} 。

2.2 链路可用流星的积分计算

下面推导 MBC 链路可用流星的积分形式, 首先做如下假设:

① 假设雷达在时间 dt 内探测到通过单元面 dS 、方向为 \hat{v}_m 、在立体角 $d\Omega$ 内的流星总数目为

$\Theta_r(m_{0r}, \hat{v}_m)$, 其中最小的流星质量为 m_{0r} ;

② 假设 MBC 链路有与雷达完全相同的单元网格、流星方向和立体角。根据上节末的讨论, 此时可以确定出链路能利用的最小的流星质量, 记为 m_{0l} 。

根据式(5), MBC 链路在这个特定单元网格处能看到的流星数目 $\Theta_l(m_{0l}, \hat{v}_m)$ 为:

$$\begin{aligned} \Theta_l(m_{0l}, \hat{v}_m) &= (s-1) c_m p_m(\hat{v}_m) m_{0l}^{1-s} = \\ &= (s-1) \cdot \left[\frac{\Theta_r(m_{0r}, \hat{v}_m)}{(s-1) m_{0r}^{1-s}} \right] \cdot m_{0l}^{1-s} = \\ &= \Theta_r(m_{0r}, \hat{v}_m) \left[\frac{m_{0l}}{m_{0r}} \right]^{1-s}. \end{aligned} \quad (6)$$

最后, 在这个时段链路可以看到的全部流星为:

$$\begin{aligned} N_l &= \iint \Theta_l(m_{0l}, \hat{v}_m) dS d\Omega = \\ &= \iint \Theta_r(m_{0r}, \hat{v}_m) \left[\frac{m_{0l}}{m_{0r}} \right]^{1-s} dS d\Omega. \end{aligned} \quad (7)$$

对上式的计算必须要进行换元, 即将对面 dS 元和立体角 $d\Omega$ 的积分转换为对笛卡儿坐标的积分。然后, 通过高斯数值积分法可以用计算机进行求解, 在此不再赘述计算过程, 下面分析计算实例。

3 MBC 性能计算实例

MBC 单跳通信距离很大, 可以达到 1 500 km 以上, 由于信道不是连续的, 而且信息通过量较小, 它的对通试验难度比较大, 可获得的公开发表的试验数据更是非常少。下面是 2 个试验数据与预测数据的对比实例。第 1 个是 1951 年英国曼彻斯特大学使用流星探测雷达记录的数据, 由于年代较为久远, 设备能力较低; 第 2 个是国内的 1 条 MBC 链路在 2006 年记录的数据, 接收机门限很低, 设备能力很好。

3.1 曼彻斯特雷达探测与计算对比

根据资料, 英国曼彻斯特大学的流星探测雷达设备参数为:

站点位置: $2^{\circ}18'W, 55^{\circ}14'N$;

发功率: 5 kW;

频率: 72 MHz;

2 部 6 阵元八木天线阵指向不同方向, 相当于每部发功率 2.5 kW, 主瓣最大增益 24 dBi, 水平和垂直面的波束宽度 10° 左右;

接收机门限: -102 dBm。

图 1(a)、(b) 分别是该雷达在 1 月份和 7 月份测得的试验数据, 该图画出了雷达观测到的流星数目的 24 h 变化。纵轴为每小时平均探测到的流星数, 横轴为时间。

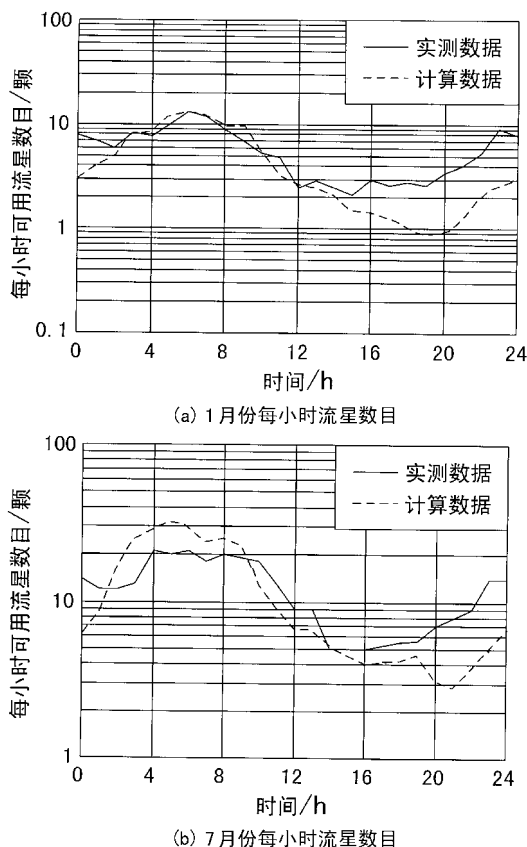


图 1 雷达探测数据与计算数据对比

本文分析的 MBC 链路模型考虑了收发站址问题, 对于流星探测雷达, 它的收站、发站位于同一地点, 这是雷达与 MBC 链路的不同之处。图 1(a)、(b) 同时根据预测结果绘制出了 1 月、7 月的每小时流星数目。

从图 1 可以看到, 1 月份实测每小时最多可观测到流星 10 颗左右, 计算结果也为 10 颗左右, 吻合很好; 实测每小时最少可观测到流星 2~3 颗, 计算结果为 1 颗左右, 偏小。7 月份实测每小时最多可观测到流星 20 颗左右, 计算结果为 30 颗左右, 结果略微偏大; 实测每小时最少可观测到流星 5 颗左右, 计算结果为 3~4 颗, 吻合尚好。还有一点需要说明的是, 由于无法得到该雷达的天线方向图, 在计算时只能根据波束宽度粗略估计出收发天线共同照亮区, 这可能会引入一些误差。

3.2 国内 MBC 链路试验与计算对比

国内某 MBC 链路试验的日期为 2006 年 5 月份, 该试验使用的是一条中纬度地区 ($30^{\circ} \sim 40^{\circ}$) 的单跳链路, 链路方向为东北—西南走向, 收发站址相距

(下转第 50 页)

298 K 提高到 353 K 时,该电源板的平均寿命可缩短 19.8 倍;若提高到 373 K,平均寿命可缩短 47 倍。

4 结束语

该电源板共进行了近 2 000 h 的加速退化试验,通过对试验数据的分析处理,最终对其关键的可靠性指标进行了合理有效地预测和评估,并且分析得出电源板在 393 K (120 ℃)时的失效模式(机理)发生了改变,这为今后模块级(板级)加速性能试验应力范围的选择提供了重要的参考依据。最后的各项指标表明,基于失效数据可靠性评估及加速性能退化试验的可靠性评估方法应用于板级电子装备的可靠性评估是可行有效的。



(上接第 43 页)

约 800 km。该 MBC 设备的接收机门限很低(不大于 -115 dBm),因此观测到的流星数目远大于 1951 年的流星探测雷达。图 2 是计算结果和实测结果的对比如。

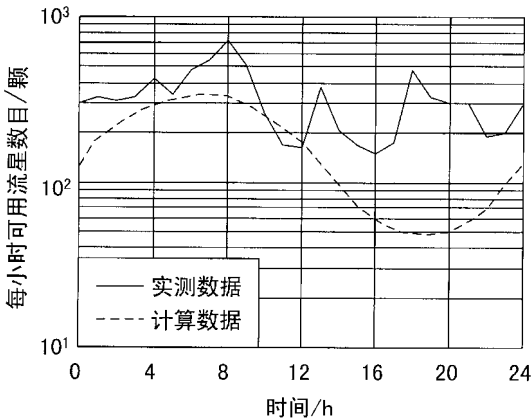


图 2 MBC 链路数据与计算数据对比

在图 2 中,在北京时间 7~8 时有流星数目最大点,实测为每小时 600~700 颗,计算为 300~400 颗左右,计算结果偏小。计算结果显示在晚上 18~20 点有流星数目最小点,为每小时 40~50 颗,但在实测过程中,午后有 Sporadic E 层的出现,实测曲线没有记录到最小点,反而出现了的 2 个反常的峰点。此外,考虑到该次试验地点距离市区不远,而接收门限很低,因此不排除有其他干扰造成接收机误记录的可能。

从上面的 2 个计算实例可以发现, MBC 链路在早晨可用流星数要大于傍晚, 24 h 可用流星数曲线呈现 S 形,这是由于地球的自转运动造成的,这一点与许多文献报道是一致的。

参考文献

[1] LU J C, MEEKER W Q. Using Degradation Measures to Estimation a Time-to-failure Distribution[J]. Techno Metrics, 1993, 35(2): 161—174.
[2] MEEKER M Q, ESCOBAR L A. Statistical Methods for Reliability Data[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
[3] 李刚. 基于多源信息融合的电子装备故障预测方法研究[D]. 石家庄: 军械工程学院. 2006: 76—85.
[4] 郭诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 39—52.
[5] LU J C, JINHO P, QING Yang. Statistical inference of a Time-to-failure Distribution Derived from Linear Degradation Data[J]. Techno Metrics, 1997, 39(4): 391—400.

作者简介

贾占强 男, (1982—), 河北石家庄军械工程学院硕士研究生。主要研究方向: 电子装备可靠性评估。

如果实测结果为 1, 在早晨这个时段计算得到的结果与实测值误差较小, 计算值在 0.5~2 之间。在傍晚这个时段二者的误差则较大, 这是由于在这个时段流星数目很少, 理论模型难以精确计算。如果此时在试验环境中还有其他信号干扰, 必然使得实测数据有大的波动, 这样就会造成计算数据相对实测数据有大的偏差。

4 结束语

通过 MBC 链路试验数据与计算结果的对比如可以看到, MBC 信道是一种非常典型的突发信道, 它使用的主要是偶发流星资源, 但是流星到达这种偶发事件是可以预报的, 因此 MBC 设备也是完全可以实用的。

平均等待时间和信息通过量是 MBC 链路的 2 个主要性能指标, 对于一条确定的链路, 使用上述理论模型可以对这 2 个指标进行估算。这对于 MBC 链路的设计、开通和外场试验具有重要意义。

参考文献

[1] 王伟. 流星余迹通信链路的分析与设计[J]. 无线电通信技术, 2007, 33(1): 4—5.
[2] OETTING J D. An Analysis of Meteor Burst Communication for Military Applications [J]. IEEE Trans. Commun., 1980(28): 1592—1601.
[3] DESOURDIS R I, OSTERGAARD J C. Meteor Burst Computer Model Validation Using High-Latitude Measures [C]. Virginia: Proc. of IEEE MILCOM' 91 Conf., 1991(2): 1—5.
[4] DESOURDIS R I. Meteor Burst Communications: Theory and Practice [M]. New York: John Wiley & Sons 1993: 59—342.

作者简介

李志勇 男, (1976—), 中国电子科技集团公司五十四研究所博士。主要研究方向: 流星突发通信技术。