

# 流星余迹通信最佳传输帧长设计

尹 德<sup>1</sup>, 李 赞<sup>1</sup>, 郝本建<sup>1</sup>, 蔡觉平<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 西安电子科技大学微电子学院, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 在分析流星余迹通信原理及其传输信道物理特性基础上, 根据流星余迹电子线密度的分布特性, 构建出流星余迹信号初始接收功率的概率密度函数. 针对以信号帧为单位的自适应变速率传输机制, 推导出欠密类余迹平均信息通过量与传输帧长的关系, 提出最佳帧长设计原则, 得到自适应传输帧长的理论最佳值. 仿真结果表明, 在满足通信可靠性及实时性的要求下, 所得最佳帧长能使系统平均信息通过量达到最大, 有效提高流星余迹信道利用率.

**关键词:** 流星余迹通信; 自适应变速率; 衰减系数; 帧结构; 概率密度函数

**中图分类号:** TN926 + .5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2229-05

## Optimum Design of Frame Length for Meteor Burst Communications

YIN De<sup>1</sup>, LI Zan<sup>1</sup>, HAO Ben-jian<sup>1</sup>, CAI Jue-ping<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Based on analyzing the principles of meteor burst communications and the physical characteristics of meteor burst channel, according to the mechanism of using the signal frame as the basic transmission unit for adaptive variable rate transmission, the effects of the frame length on system performance are analyzed in this paper. According to the line electron density distribution of meteor bursts, the probability density function of the initial signal power received from the trails is derived. In terms of the function of the received signal power, the relationship between the system throughput and the frame length is built and the principle of frame length selection is determined. The simulation results show that the optimized frame length can maximize the average throughput of the system and make the best use of the meteor burst channel, while satisfying the reliability and instantaneity of the meteor burst communication system.

**Key words:** meteor burst communication (MBC); adaptive variable rate; channel decay constant; structure of data frame; probability density function (PDF)

## 1 引言

流星余迹通信 (MBC) 是一种利用流星电离出的余迹对 VHF 无线电波进行反射和散射, 以达到通信目的的超视距突发通信方式<sup>[1-5]</sup>, 具有较低的截获频率、良好的隐蔽性、极强的抗干扰能力和抗毁特性, 在应急通信领域中具有特殊地位. 受流星余迹特定条件的限制, 流星通信的平均信息均数据通过率很低 (一般不超过几十比特/秒)<sup>[5]</sup>, 采用自适应变速率调制技术能够有效提高流星余迹通信平均数据通过率, 改善信道实时通信性能<sup>[8-10]</sup>.

在流星余迹通信中, 信息传输的基本单位是包, 由包组成帧, 信息最终以帧的形式进行传输. 帧长  $T$  是流

星余迹通信中的一个重要参数, 它的选择对信息传输速率、平均数据通过率等参数有很大影响. 在国内外现有的流星余迹通信最佳帧长设计理论中, 帧长是针对某一特定余迹, 在以某一特定速率或是信道允许的最大速率传输信息的条件下, 通过理论推导确定<sup>[8-12]</sup>. 在实际流星余迹通信中, 出现余迹的电子线密度具有随机性和连续性, 若采用现有方法, 则每一颗流星都对应一最佳帧长值, 在系统中难以实现; 同时, 系统难以根据信道状况实时地以信道允许的最大速率来传输信息. 因此, 针对流星余迹通信的实际特性, 本文提出了一种新颖的流星余迹通信最佳帧长设计方法, 有效地解决了上述现有流星余迹通信最佳帧长设计理论, 在实际应用中存在的问题.

收稿日期: 2009-05-20; 修回日期: 2010-05-12

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2009AA01Z237); 新世纪优秀人才支持计划资助 (No. NCET-07-0653); 国家新一代宽带无线移动通信网科技重大专项 (No. 2010ZX03006-002); 国家自然科学基金 (No. 61072070); 高等学校学科创新引智计划资助 (No. B08038); 长江学者和创新团队发展计划资助 (No. IRT0852)

本文由以下几个部分组成;第二部分首先研究欠密类流星余迹通信接收信号特性;第三部分讨论流星余迹通信最佳帧长设计方法;第四部分对所设计方法进行仿真及性能分析;最后,第五部分对本文所得结论进行进一步强调与说明。

## 2 流星余迹分布特性与接收信号功率

按照流星余迹电子线密度的大小,可以将其分为两类:电子线密度大于等于  $1.0 \times 10^{14} \text{ e/m}$  的流星余迹称为过密类余迹,而电子线密度小于  $1.0 \times 10^{14} \text{ e/m}$  的称为欠密类余迹<sup>[1,2]</sup>。流星体积越大,电子线密度越高,出现的概率越小。电子线密度每升高一个数量级,流星出现的数目就降低一个数量级<sup>[1,2]</sup>。由于到达余迹为欠密类的概率远远大于为过密类的概率,因而本文主要针对欠密类流星余迹讨论最佳帧长的设计方法。

设流星余迹的电子线密度为  $q$ ,  $q_0$  为到达流星所对应余迹的电子线密度下限,则  $q_0/q$  具有  $[0,1]$  分布特性,可求得流星余迹电子线密度  $q$  的概率密度函数为:

$$f(q) = q_0/q^2 \quad (1)$$

不失一般性,设可供通信的流星余迹的电子线密度下限为  $1.0 \times 10^{13} \text{ e/m}$ ,则可供通信的流星的电子线密度概率函数为:

$$f(q) = 10^{13}/q^2 \quad (2)$$

式中,  $q \in [1.0 \times 10^{13}, +\infty)$ 。

欠密类流星余迹通信的接收信号功率  $P_{Ru}$  呈指数衰减,其值主要与通信距离  $L_m$ 、工作波长  $\lambda$ 、发射频率  $f_i$ 、余迹的电子线密度  $q$ 、发射功率  $P_T$ 、发送天线增益  $G_T$  及接收天线增益  $G_R$  等参数有关<sup>[13]</sup>。接收信号功率表达式为:

$$P_{Ru} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^3 q^2 r_e^2 \sin^2 \alpha}{16\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \cos^2 \beta \sin^2 \varphi)} \times \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \varphi}\right) \quad (3)$$

式(3)中,相关变量所代表的物理意义如表 1 所示。

表 1 变量对应的物理意义

变量	物理意义	变量	物理意义
$R_R$	接收天线到余迹的距离	$R_T$	发射天线到余迹的距离
$r_e$	电子半径 $r_e = 2.82 \times 10^{-15} \text{ m}$	$r_0$	余迹初始半径
$\alpha$	余迹电场矢量 $E$ 与 $R_R$ 之间的夹角	$\varphi$	$R_R$ 与 $R_T$ 夹角的一半
$\beta$	余迹轴向与 $R_T R_R$ 构成平面的夹角		

欠密类流星余迹对应的电子线密度  $q$  的取值范围为  $[1 \times 10^{13}, 1 \times 10^{14}]$ ,由式(2)可得欠密类余迹的概率分布为:

$$F(1 \times 10^{14}) = 0.9 \quad (4)$$

根据式(2)、(4),欠密类流星余迹对应的电子线密度概率密度函数为:

$$f(q) = 10^{13}/(0.9 \times q^2) \quad (5)$$

欠密类余迹的初始信号接收功率  $p_{u0}$  的概率密度函数为:

$$f(p_{u0}) = \frac{1}{2} \times 10^{13} \sqrt{m} \times p_{u0}^{-\frac{3}{2}} / 0.9 \quad (6)$$

$$m = \frac{P_T G_T G_R \lambda^3 r_e^2 \sin^2 \alpha}{16\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \cos^2 \beta \sin^2 \varphi)} \times \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \varphi}\right) \quad (7)$$

## 3 流星余迹通信最优传输帧长设计

一般情况下,通过自适应改变编码调制方式可以实现流星余迹通信的自适应变速率传输,即发送端根据接收端反馈回来的信道信息,自适应地改变调制方式来传送信息,从而达到改善误码性能、提高系统平均数据通过量的目的。在整个变速率调制过程中,由于码元传输速率不变,所以系统带宽恒定。采用这种方式可以降低系统的处理复杂度,同时更有效地利用系统的频带资源。在流星余迹通信中,帧长的选择对通信的实时性和有效性有很大的影响,最佳帧长即是指在不影响通信实时性的前提下,欠密类流星余迹的平均信息速率达到最大时所对应的帧长。

### 3.1 自适应变速率信息传输格式

不失一般性,在自适应变速率传输的流星余迹通信系统中,假设信息传输条件为:

- (1)信息的基本单位是包,每包信息所包含信息量是相同的;
- (2)信息以帧的形式进行传输,而帧长  $T$  和开销长度  $a$  是固定的;
- (3)自适应变速率是通过自适应的改变数据包的调制方式实现的;
- (4)在同一帧当中,不同数据包的调制方式及其长度是相同的;
- (5)一帧当中,数据包个数是由调制方式和当时的信道状况决定的。

流星余迹通信中的基本帧结构如图 1 所示。通信中,同步信息的可靠性高于传输信号的可靠性,信息帧中开销的主要功能是同步以及寻址。为了保证信息传输的可靠性,开销以系统允许的最低速率进行传输。根据条件(2)、(4)、(5)可知,一帧中信息传输时间  $(T - a)$  是一定的,且数据包个数是时间  $t$  的函数,所以数据包长度也是时间  $t$  的函数。

根据图 1,帧长  $T$  可表示为:

$$T = n(t) \cdot P(t) + a \quad (8)$$

式中,  $n(t)$  为  $t$  时所传帧中数据包的个数;  $P(t)$  为  $t$  时所传帧中单个数据包的长度,单位为 ms。可以看出  $n$

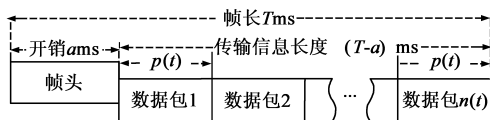


图1 基本帧结构

$(t)$ 和  $P(t)$  的乘积为定值  $(T-a)$  ms。

### 3.2 最佳传输帧长设计

流星余迹信道按一定规律时变,导致接收信号的信噪比以相同规律时变,所以信道容量也是时变的.在信道参数已知的情况下进行判决选择,在特定的几档传输速率中选出系统允许的最大速率发送信息;当信道不再支持该速率时,再进行一次判决,选出系统允许的最大速率来传送信息,如此往复。

对于确定的通信双方,信道的噪声特性是一定的,双方的工作频率也是固定的.根据经验公式可求出流星余迹通信系统中欠密类信道的主要参数.对于单个余迹而言,由于初始信号接收功率  $p_{u0}$  不同,最大信息通过量对应的帧长也不同,而不同的帧长对应着不同的通信持续时间.对于确定的通信双方来说,初始信号接收功率  $p_{u0}$  是变化的,而衰减系数  $\tau$  和噪声特性则是固定的,因而对最佳帧长问题的研究可转变为对一个欠密类流星余迹统计问题的研究。

图2表示某一余迹在采用  $n$  档速率传输信息时的变速率过程.图中,  $SNR(t)$  表示接收信号在时刻  $t$  的信噪比;  $SNR(0)$  表示初始接收信噪比;  $T$  代表通信的帧长;  $SNR_1, SNR_2, \dots, SNR_n$  代表的是对应于  $n$  档信息传输速率下信噪比门限值;  $t_1, t_2, \dots, t_n$  为每档速率的通信可持续时间。

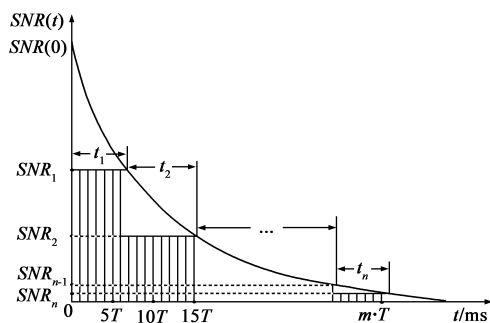


图2 变速率传输与帧长的关系曲线图

根据经验公式可得,该欠密类余迹的可持续通信时间为:

$$L'_{p_0} = \tau \cdot \ln[SNR(0)/SNR_n] = t_1 + t_2 + \dots + t_n \quad (9)$$

实际的通信时间为:

$$L_{p_0}(T) = \text{int}(L'_{p_0}/T) \cdot T = l_{p_0} \cdot T \quad (10)$$

有效通信时间为:

$$T_{p0u} = l_{p_0} \times (T - a) = l_{p_0} \times T - l_{p_0} \times a \quad (11)$$

信息通过量为:

$$\begin{aligned} C_{p_0}(T) &= (T - a) \sum_{k=1}^{l_{p_0}} c(k \cdot T) \\ &= T_{SNR1} v_1 + T_{SNR2} v_2 + \dots + T_{SNRn} v_n \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $T_{SNR1}, T_{SNR2}, \dots, T_{SNRn}$  分别表示以 1 ~  $n$  档速率通信的有效通信时间,其计算式如下:

$$T_{SNR1} = \text{int}(T_{SNR(0)} - SNR_1 / T) \cdot T \quad (13)$$

$$T_{SNR2} = \text{int}[(T_{SNR(0)} - SNR_2 - T_{SNR1}) / T] \cdot T \quad (14)$$

$$T_{SNR3} = \text{int}[(T_{SNR(0)} - SNR_3 - T_{SNR1} - T_{SNR2}) / T] \cdot T \quad (15)$$

⋮

$$\begin{aligned} T_{SNRn} &= \text{int}[(T_{SNR(0)} - SNR_n - 1 - T_{SNR1} - T_{SNR2} \\ &\quad - T_{SNR3} - \dots - T_{SNRn-1}) / T] \cdot T \end{aligned} \quad (16)$$

根据式(6)、(10),欠密类余迹的平均通信持续时间为:

$$L(T) = E[L_{p_0}(T)] = \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} f(p_0) \cdot L_{p_0}(T) dp_0 \quad (17)$$

根据式(6)、(12),欠密类余迹的平均信息通过量为:

$$C(T) = E[C_{p_0}(T)] = \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} f(p_0) \cdot C_{p_0}(T) dp_0 \quad (18)$$

式中,函数  $E(\cdot)$  表示期望函数;  $p_{\max}, p_{\min}$  分别表示欠密类余迹初始接收功率的上下限。

流星余迹通信是一种突发通信方式,为保证通信的实时性,平均等待时间一直是系统设计中的一个重要参数,流星的突发间隔可以通过一段时间的观察得到,设为  $L_B$ ,则该通信链路平均等待时间  $L_w$  为:

$$L_w = L_B - L(T) \quad (19)$$

通过数学仿真发现  $L(T)$  与  $T$  成反比关系,因而平均等待时间与  $T$  成正比关系.因而当平均等待时间作为一个系统设计指标确定时,就可以根据式(18)、(19),求得系统设计中帧长的上限值  $T_{\max}$ ,  $T \in (0, T_{\max}]$ 。

由式(18)可以看出,信息通过量  $C$  是  $T$  的函数.在  $T$  的取值区间内对函数  $C$  求导:

$$\frac{dC(T)}{dT} = E[C'_{p_0}(T)] = \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} f(p_0) \cdot C'_{p_0}(T) dp_0 \quad (20)$$

求出信息通过量  $C$  在区间  $(0, T_{\max}]$  内达到最大时所对应的  $T$ . 所得  $T$  即为所要求的最佳帧长值  $T_{\text{opt}}$ :

$$T_{\text{opt}} = T | C(T) = \max(C_{p_0}(T)) \quad (21)$$

## 4 仿真及性能分析

本文以典型的采用三档速率(即  $n=3$ )的自适应变速率流星余迹通信系统为例,讨论传输帧长对通信性能的影响,并确定出最佳帧长值.仿真条件为:信号带宽为 64kHz;三档信息传输速率为 64kbps、32kbps、16kbps;与三档速率对应的门限信噪比分别为 10.1、5.2、2.6;信道衰减系数取值分别为 0.2s、0.3s、0.5s;噪声功率为  $m$ .其中,变速门限的取值是以对应速率及调

制方式进行信息传输,平均误码率为  $10^{-4}$  时对应的信噪比的值.

4.1 单余迹的信息通过量与帧长的关系

设余迹的初始接收信噪比值  $SNR(0)$  为 50,单余迹的信息通过量与帧长的关系如图 3 所示.

图 3 反映了帧长与信息通过量之间的关系.由上图可以看出,帧长与信息通过量并非单调函数.随帧长的增加,信息通过量曲线趋于平缓.当帧长比较小时,信息通过量随着帧长增加而单调增加;当帧长大于一定值后,信息通过量出现波动.仿真结果与式(12)相吻合.信道衰减系数  $\tau$  越大,信道衰减越慢,信息通过量越大.

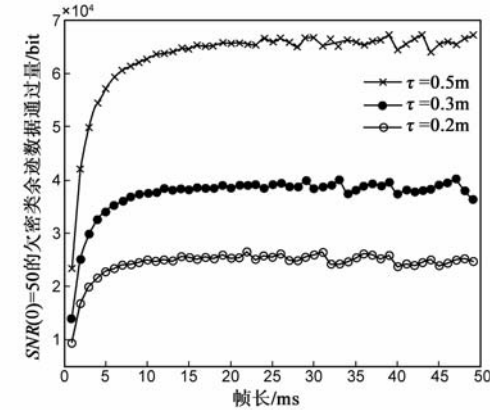


图3  $SNR(0)=50$ 时信息通过量与帧长的关系曲线图

4.2 单余迹的通信持续时间与帧长的关系

设余迹的初始接收信噪比值  $SNR(0)$  为 50,单余迹的通信持续时间与帧长的关系如图 4 所示.

图 4 反映了帧长与通信持续时间之间的关系.由上图可以看出,通信持续时间随帧长取值变化而上下波动,与式(10)相吻合.信道衰减系数  $\tau$  越大,信道衰减越慢,对于相同的初始接收信噪比而言,通信持续时间越长,与参数分析结论相符.

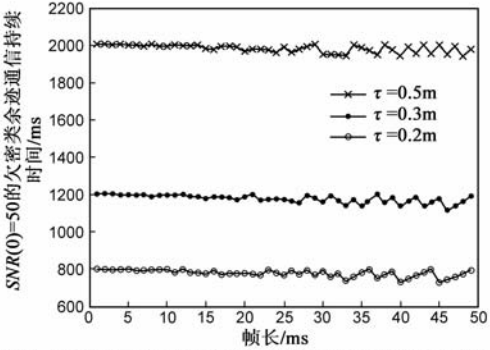


图4  $SNR(0)=50$ 时通信持续时间与帧长的关系曲线图

4.3 基于流星信道分布特性的最佳帧长

欠密类余迹平均通信持续时间与帧长之间的关系如图 5 所示.

由图 5 可以看出,平均通信持续时间与帧长成反比关系.根据式(19)可知,帧长越长,平均通信等待时间越长,即:可以采取较小的帧长来降低系统平均等待时间.

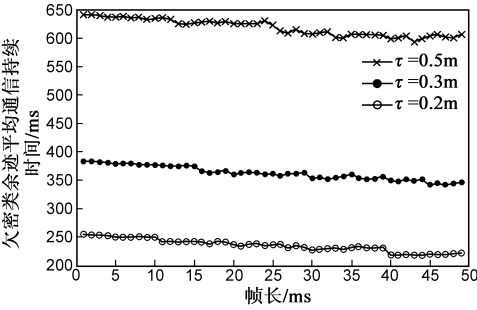


图5 欠密类余迹平均通信持续时间与帧长的曲线图

欠密类余迹平均信息通过量与帧长的关系如图 6 所示.

由图 6 可以看出,当帧长小于 20ms 时,欠密类余迹的平均信息通过量随帧长的增加而快速增大;当帧长取值大于 20ms 时,曲线变得平缓;当帧长取值大于某一值后,随着帧长的增大,信息通过量开始呈现下降趋势.信道衰减系数  $\tau$  越小,信道衰减越快,信息通过量随帧长减小的趋势也就越明显,最佳帧长值便越小.

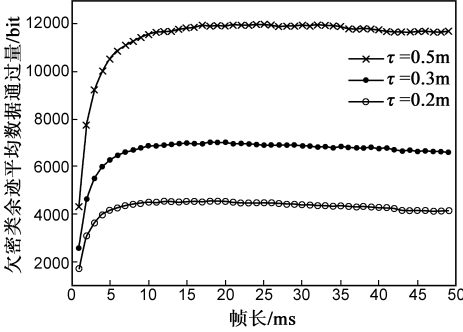


图6 欠密类余迹平均信息通过量与帧长的关系曲线图

基于系统对平均等待时间的要求,不妨设与 0.2s、0.3s、0.5s 三个信道衰减系数相对应的通信链路最大帧长值为 70ms.在此条件下,衰减系数  $\tau$  取不同值时所对应的最佳帧长值如下表所示.

表 2 不同  $\tau$  时所对应的最佳帧长值

$\tau/s$	0.2	0.3	0.5
最佳帧长值/ms	33	44	48

由式(3)可知,提高发射功率  $P_T$  以及收发天线增益  $G_R$ 、 $G_T$ ,不仅可以获得更高质量的接收信号,还可以利用更多更小的余迹.因而,对不同环境下最佳帧长的计算,其区别仅在于初始接收信号信噪比区间的变化.由此,针对不同的通信需求,可以通过合理的参数设置,用该方法便可求得符合该环境的最佳帧长值.

## 5 结论

流星余迹通信是一种适合于信息量少、非实时的应急通信手段。基于流星余迹通信的间断性与突发性,如何提高流星余迹通信的平均信息通过量、缩短平均等待时间已成为研究流星余迹通信永恒的课题。本文从流星余迹通信的实际特性出发,基于传输帧长对平均信息通过量、平均等待时间两重要参数的影响,得出了该流星余迹最佳帧长设计方法。仿真结果表明,在满足通信可靠性及实时性的要求下,利用该方法得到的最佳帧长,能够使系统的平均信息通过量达到最大,有效地提高流星余迹信道利用率,对流星余迹通信系统的设计起到了积极作用。

### 参考文献:

- [1] Sorin Davidovici. Performance of a meteor-burst communication system using packet messages with variable data rates[J]. IEEE Trans Commun, January 1989, 37(1): 6–17.
- [2] Scott L Miller. A comparison of protocols for a meteor-burst channel based on a time-varying channel model[J]. IEEE Trans Commun, January 1989, 37(1): 18–30.
- [3] Ivan Antipov. The meteor burst radio channel using prospects [A]. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, 2006. TCSET 2006 [C]. Lviv-Slavsko, Ukraine, Feb. 28 2006-March 4 2006. 453–453.
- [4] Martin W. Abel. Meteor burst communications: bits per burst performance bounds [J]. IEEE Trans Commun, September 1986, COM-34(9): 927–936.
- [5] 李赞, 陈艳霞, 刁树林, 常义林. 基于快速信道捕获与系数映射均衡的流星通信接收机[J]. 电子学报, 2005, 33(10): 1729–1733.  
Li Zan. A Receiver for meteor burst communication based on equalizer coefficients direct adaptation via channel acquisition [J]. Acta Electronica Sinica, October 2005, 33(10): 1729–1733. (in Chinese)
- [6] Dacid W. Brown. A physical meteor-burst propagation model and some significant results for communication system design [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, September 1985, SAC-3(5): 745–755.
- [7] Zan Li. Semi-blind joint data equalization and channel estimation for meteor burst communication[A]. Advanced Information Networking and Applications, 2006. AINA 2006. 20th International Conference on, Volume 1 [C]. Vienna, Austria, 18–20 April 2006. 617–622.
- [8] Rong SUN. Multilayer coding scheme used in MBC[A]. Advanced Communication Technology, 2006. ICACT 2006. The 8th International Conference Volume 1 [C]. Phoenix Park, Republic of Korea, 20–22 Feb 2006. 579–582.

- [9] Shou Y Mui. A comparison of fixed and variable-rate signaling for meteor burst communications [J]. IEEE Trans. Commun, Feb./March/April 1994, 42(2,3,4): 211–215.
- [10] Y Baltaci. A novel data-rate adaption approach for meteor burst communications: direct-sequence spread-spectrum modulation [A]. 6th International Conference on Radio Receivers and Associated Systems [C]. Bath, UK, 26–27 Sept. 1995. 148–153.
- [11] Rui Lint. Packet length optimizations in meteor burst communication systems [A]. Military Communications Conference, 1991. MILCOM'91, vol. 2 [A]. McLean, VA, 4–7 Nov 1991. 769–773.
- [12] Vladimir Korneev. Optimization of concurrent data and high-precision time transfer modes in meteor burst synchronization equipment [A]. Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International [C]. Geneva, May 29 2007–June 1 2007. 923–926.
- [13] V R Eshlmann. Theory of radio reflection from electron ion clouds [J]. IRE Trans Antenna Propagation, multiple-access, Jan. 1955, (1): 32–39.

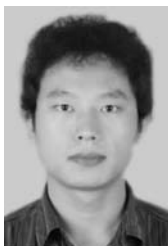
### 作者简介:



尹 德 男, 1984 年 9 月生于山西怀仁, 硕士。研究方向: 流星余迹通信、数字信号处理等。  
E-mail: yinde9@126.com



李 赞 女, 1975 年出生于陕西省西安市, 现为西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室教授, 博士生导师, 军事通信学学术带头人, 主要研究方向: 无线通信, 数字信号处理, 流星余迹通信, 发表学术论文近 70 篇。  
E-mail: zanli@xidian.edu.cn



郝本建 男, 1982 年出生于山东省泰安市, 现为西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向: 无线通信, 流星余迹通信, 无线传感器网络。  
E-mail: bjhao@xidian.edu.cn