

移动蜂窝模型中的多址接入性能研究

张立冬¹, 韩勇², 尹浩³, 陈强³, 由飞⁴

(1. 解放军理工大学通信工程学院 南京 210007; 2. 国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073;
3. 总参第61研究所 北京 丰台区 100141; 4. 总参第51研究所 北京 丰台区 100072)

【摘要】提出了一种适合于武器协同数据链的移动蜂窝模型,并针对该模型提出了基于离散FDM的FHMA/CDMA相结合的多址接入方式。该方式理论上能够为无穷多的参与平台提供服务,且具有较低的发送延迟。该文对基于离散FDM的FHMA/CDMA相结合的多址接入方式的数据分组成功发送率、网络吞吐量以及信息时延等性能指标进行了理论分析,并仿真分析了码分信道数、扩频增益等主要参数对网络性能所产生的影响。结论表明,所提出的多址方式具有较好的接入性能,能够满足武器协同数据链网络的低时延应用需求。

关键词 码分多址; 频分复用; 跳频多址; 移动蜂窝模型; 武器协同数据链

中图分类号 TN915.851

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.06.009

Performance Analysis for Multiple Access of the Mobile-Cellular Model

ZHANG Li-dong¹, HAN Yong², YIN Hao³, CHEN Qiang³, and YOU Fei⁴

(1. ICE, PLAUST Nanjing 210007; 2. College of Institute of Information Engineering, NUDT Changsha 410073;
3. PLA's 61st Research Center Fengtai Beijing 100141; 4. PLA's 51st Research Center Fengtai Beijing 100072)

Abstract The mobile-cellular model for weapon cooperation data link (WCDL) is proposed. The frequency hopping/code division multiple access (FH/CDMA) for this model is studied based on discrete frequency division multiplexing (FDM). Theoretically, the multiple access technology can sustain the service for infinite users and provide low delay service. The performances of success rate, throughput, and delay are analyzed. The influences of the main parameters such as the number of channels and the gain of spreading spectrum are simulated. The results demonstrate that the multiple access technology can meet the low delay application request of WCDL with better performances.

Key words CDMA; FDM; FHMA; mobile-cellular model; WCDL

武器协同数据链(WCDL)在未来战争中将扮演极为重要的角色,成为联系指挥中心、传感器平台、武器平台间的信息“高速公路”。武器协同数据链同传统数据链相比,特点之一就是必须采用Ad hoc组网技术、支持多跳组网连接^[1]。

然而,目前的Ad hoc网络中主要以时间分配调度模型为基础提供节点的多址接入方式,这样的多址方式存在以下问题:

(1) 单跳覆盖范围受限,难以优化整个无线网络。代表性的时间调度模型是CSMA(carrier sense multiple access),发送数据前的信道侦听或RTS/CTS交互要求尽量小的传输时延,否则冲突加剧,性能恶化,间接地限制了发送数据单跳可达范围,网络扩展只能通过增加转发次数来实现,整个网络伸缩

不灵活,难以折中与优化。

(2) 多跳转发传输时延较大且不确定,难以支持实时业务。从有效利用空间复用考虑,不同单跳区域需建立彼此独立的时间模型,因而发送数据多跳转发时需不断更新时间模型,造成转发时延较大且不确定,限制了业务支持能力。

(3) 网络吞吐性能受到隐藏终端/暴露终端限制,难以设计并发信道。

(4) 抗干扰能力弱。

20世纪80年代,美国就开始着手解决这个问题,提出了一种基于码分多址的网络体制,当时的研究内容涵盖了扩频收发设计、多址接入性能评估、抗多径衰落和抗干扰能力分析、多跳转发机制系统模型、系统资源空分复用、仿真等问题^[2-7]。近年来这

一领域的研究也引起了广泛的关注,文献[8]讨论了扩频多址接入方式下的自组织网络的接入性能。文献[9-11]分析了串行干扰抵消算法对CDMA自组织网络接入能力(容量)以及定位的影响。文献[12-13]研究了CDMA自组织网络的物理层传输问题,其中文献[12]讨论了自适应调制算法,文献[13]讨论了多码传输方式在衰落信道中的性能。

这种体制尽管具有网络灵活、支持多个用户同时收发、延时小等优点,但是由于多址干扰、远近效应、地址资源有限等因素,这种纯码分多址的网络体制并不能支持像武器协同数据链这样具有大规模组网需求的自组织网络。为了解决这个问题,本文提出了移动蜂窝模型和基于离散频分复用(FDM)的跳频多址/码分多址(FHMA/CDMA)相结合的多址接入方式。这种接入体制能够支持大规模组网,通过仿真和数值计算可以证明,该方式具有较为优越的多址接入性能,能够很好地满足武器协同数据链网络的多址接入需求。

1 移动蜂窝模型

所谓移动蜂窝是针对传统蜂窝系统而言的,是指蜂窝以及蜂窝内部的参与平台都是动态的、移动的,如图1所示。空间节点大部分为机动平台,在节点运动过程中,蜂窝的结构组成会不断变化、消失或生成。同传统的蜂窝系统相比,最大的差别在于移动蜂窝系统并不存在固定的基站,整个系统是动态存在和分布的。模型虚拟地将空间分为若干比邻的“蜂窝”,蜂窝内部有一个动态选择的控制节点和若干的桥节点^[5]。控制节点负责蜂窝内部的资源分配,以及参与节点的加入许可和退出管理;桥节点则主要负责蜂窝间通信的连接。控制节点和桥节点共同实现了传统蜂窝网络中基站的部分功能。

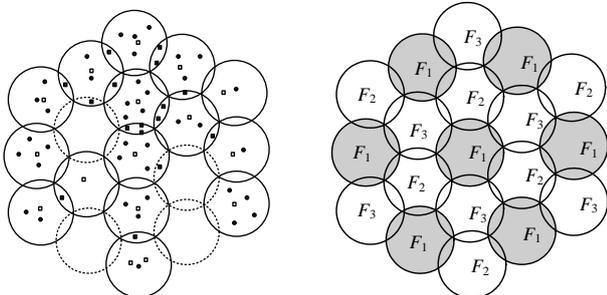


图1 移动蜂窝模型 图2 复用因子为3的FDM方案

蜂窝之间进行频分复用,如图2所示为复用因子为3的FDM分配方案。整个可用频段划分为3个不重叠的频带,分别分配给不相邻的蜂窝。同传统蜂

窝类似,这样的资源分配方式,具有一定的同频干扰问题,但由于无线信道的衰减特性,这种干扰并不严重。因此,整个网络理论上可以支持无限多的参与节点。

若采用连续的FDM,则系统的抗截获、抗干扰能力将减弱,因此本文采用离散FDM的方法,即在分频的过程中,频段 F_k 并不是连续的,而是由一些离散的频段所组成,跳频点则伪随机地分布在这些离散的频段上。这样的措施在提高网络的抗截获、抗干扰能力的同时,也要增加额外的用作离散频段间保护频带的频率资源开销。在如图3所示的另一维, M 个扩频码组将同频域的FHMA相结合,能够进一步提高网络容量。这种多址方式的另一个重要好处在于能够支持多个用户同时发送和接收数据,同时通信的用户数目将取决于FH/CDMA的设计以及用户平台的硬件条件。在接下来的性能分析过程中,假设网络是同步的,跳频信道和码分信道均为理想正交。

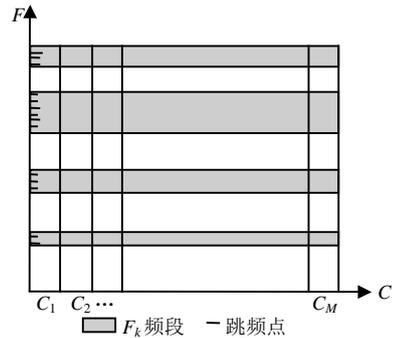


图3 基于离散FDM的FH/CDMA

2 分组传输成功概率分析

对于任何网络,数据分组传输成功概率都是一个重要的性能指标,直接反映了网络的运行状态和效率。过多的分组错误将致使网络效率低下,资源浪费。影响这个指标的因素主要来自于干扰和分组冲突。下面将分析这种基于离散FDM的FH/CDMA多址接入方式的分组传输成功概率性能。

设有 Z 个理想正交的FH信道,用户在各个FH信道是均匀分布的。考虑在一个FH信道内系统可以提供 M 个码分信道,各个用户在需要发送数据时随机地占用 M 个扩频码中的任一个。考虑同步系统,即各用户的信息发送均是在时隙的开始时进行,若忽略噪声的影响,则数据分组发送成功概率可表示为:

$$\begin{cases} P_s(k) = 1 & k = 1 \\ 0 \leq P_s(k) \leq 1 & k \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 k 为一个FH信道内的某段时间内发送数据的用户数。不失一般性, 研究 F_1 信道的成功概率性能, 定义 F_1 信道的吞吐量为 T_{F_1} , 则有:

$$T_{F_1} = E(kP_s(k)) = \sum_{k=1}^{\infty} kP_s(k)f(k) \quad (2)$$

式中 $f(k)$ 为数据分组到达的分布概率。设多址信道为理想的离散无记忆二进制信道, 每个数据分组的长度为 L , 则:

$$P_s(k) = 1 - P_e \quad (3)$$

式中 P_e 为数据分组错误概率。若考虑数据分组错误是由数据分组冲突和多址干扰造成时, 有:

$$P_e = 1 - (1 - P_{\text{MAIE}})^L (1 - P_{\text{CE}}) \quad (4)$$

式中 P_{MAIE} 为由于多址干扰而造成的数据比特传输错误概率; P_{CE} 为由于数据分组冲突所产生的传输错误概率。采用标准高斯近似算法^[11], 令所有用户站点都使用扩频增益为 N 的伪随机码, 则由多址干扰而产生的系统平均误比特率可表示为^[14]:

$$P_{\text{MAIE}} = \begin{cases} Q(\sqrt{3N/(k-1)}) & k \geq 2 \\ 0 & k = 0, 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du$ 对于同步系统, 由于数据分组冲突所产生的传输错误可表示为:

$$P_{\text{CE}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{k-1} \quad (6)$$

由式(4)可知, 影响分组成功传输概率的因素有两个, 一是多址干扰, 另一个是分组冲突。多址干扰会造成分组内的比特错误, 在不考虑编码的情况下, 每个错误比特都将造成分组的错误, 因此, 分组长度 L 必将对分组的成功传输概率产生影响。类似于CDMA多址方式, 扩频增益 N , 同时发送数据的用户数目 k 也都将对数据分组成功传输概率产生影响, 体现在多址干扰中如式(5)所示。只有当不同的用户选用相同的扩频码组时才会产生分组冲突, 反映如式(6)所示。

3 吞吐量分析

设FH信道内的分组到达服从均值为 λ 的泊松分布, 则在 t_0 时间内的网络负载和到达 k 个数据分组的概率可以分别表示为:

$$G = \lambda t_0 \quad (7)$$

$$f_{t_0}(k) = \frac{(\lambda t_0)^k e^{-\lambda t_0}}{k!} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)可得单个FH信道(如 F_1 信道)

的吞吐量为^[2]:

$$\begin{aligned} T_{F_1} &= M \sum_{k=1}^{\infty} kP_s(k)f_{t_0}(k) = \\ &M \sum_{k=1}^{\infty} kP_s(k) \frac{\left(\frac{\lambda t_0}{M}\right)^k e^{-\left(\frac{\lambda t_0}{M}\right)}}{k!} = \\ &Me^{\frac{G}{M}} \sum_{k=1}^{\infty} P_s(k) \left(\frac{G}{M}\right)^k / (k-1)! \end{aligned} \quad (9)$$

由于FH信道为理想正交, 因此单蜂窝的吞吐量可以表示为:

$$T_{\text{total}} = T_{F_1} + T_{F_2} + \dots + T_{F_Z} \approx ZT_{F_1} \quad (10)$$

由式(10)可知, 系统总的吞吐量同FH信道数目以及单个跳频信道的吞吐量成正比。对于单个跳频信道的吞吐量, 则回归到了码分多址问题。如式(9)中, 吞吐量同码分信道数目、数据发送成功概率成正比, 网络负载对吞吐量的影响是一种加权的指数形式, 将在第5节对其详细分析。

4 时延分析

对于这种基于离散FDM的FHMA/CDMA接入方式, 节点可以做到随机接入, 无需排队。在理想条件下, 数据分组的发送时延近似为0, 因此网络延迟只包括传输时延和处理时延两部分。然而在实际环境中, 由于蜂窝内以及蜂窝间的同频干扰和带内噪声而产生错误分组, 若上层产生的为TCP协议类型, 在不超过分组最大延时限制的情况下, 分组出错则需要重传, 从而产生延迟。

若平均一个分组需要经过 N_R 次重传才能成功, 则发送一个数据分组所需要的平均时间为:

$$D_f = D_s + \frac{y+1}{2} N_R D_s \quad (11)$$

由网络负载 G 和吞吐量 T 的概念可知, 一个分组的平均重传次数为 G/T , 则有:

$$N_R = G/T - 1 \quad (12)$$

代入式(11), 有:

$$D_f = D_s + \frac{y+1}{2} (G/T - 1) D_s \quad (13)$$

综合式(9)和式(13)可得数据分组的平均时延性能表达式为:

$$D_f = D_s + D_s \frac{y+1}{2} \left[\frac{Ge^{\frac{G}{M}}}{M \sum_{k=1}^{\infty} P_s(k) \left(\frac{G}{M}\right)^{k-1} / (k-1)!} - 1 \right] \quad (14)$$

由式(14)可知,数据分组的平均时延受到网络负载、码分信道数目、分组成功传输概率的影响和制约。理论上,网络负载增加将导致时延的增大;高的数据分组成功发送概率和更多的码分信道数目将减小网络时延。下面通过仿真和数值计算证明这个结论。

5 仿真与数值结果

仿真过程中依然假设FH信道以及扩频信道是理想正交的,采用同步模式。为了保持同步,在时间域需要划分时隙,设数据都是在时隙开始时发送。

如图4所示为码分信道数目 M 对数据分组传输成功概率的影响。扩频增益 $N=127$,分组长度 $L=200$ bit。由图可知, M 对网络中分组成功传输概率的影响非常大。随着 M 的增加,成功传输概率明显增加。这样的结果主要是因为随着 M 的增加,数据分组的冲突概率会减小。在相同的网络负载条件下,多址干扰产生的错误分组理论上相同,但 M 的增加导致分组冲突的概率降低,所以累积的结果是分组的成功概率明显增加。如图5所示为扩频增益 N 对数据分组成功概率的影响。其中,码分信道数目 $M=32$,数据分组长 $L=200$ bit。在前述同步的假设条件下, N 的增加不会对分组冲突概率有影响,然而会对多址干扰产生影响, N 增大,将抑制多址干扰,从而减小分组由于多址干扰而产生的错误概率。

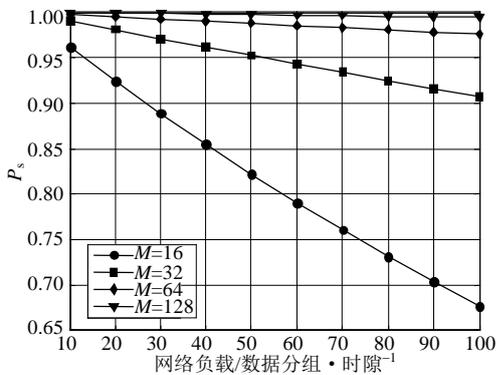


图4 M 对分组传输成功概率的影响

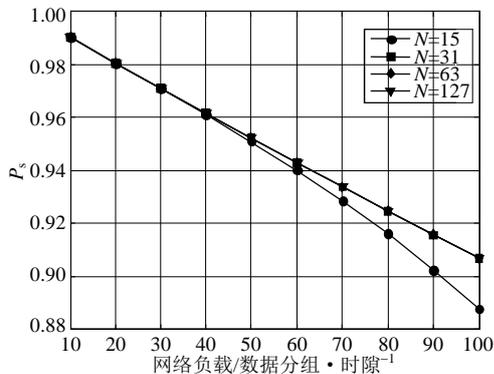


图5 N 对分组传输成功概率的影响

如图6所示为数据分组长度 L 对分组传输成功概率的影响,其中 $N=127, M=32$ 。由图可知,数据分组长度对发送成功率有轻微的影响,随着分组的变小,网络中成功传输的概率变大。这一点可由式(4)的物理意义来解释:当 L 增加且没有编码措施保护时,分组会由于多址干扰的存在而增加错误概率。所以当 L 减小时,分组的错误概率会减小,成功发送概率增加。

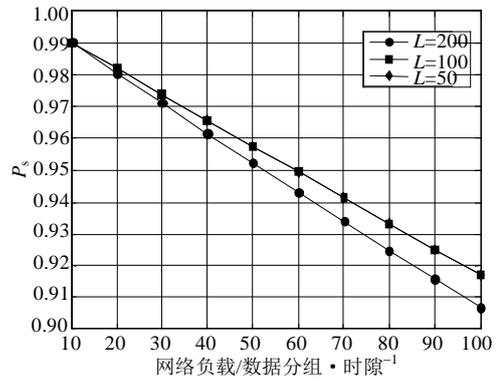


图6 L 对分组传输成功概率的影响

如图7所示为 $N=127, L=200$ 的网络吞吐量曲线。由图可知,当网络负载较大时,码分信道必须达到一定数目的情况下才能得到较理想的吞吐量性能。图中,当 $M \geq 32$ 时,系统具有较好的吞吐量性能。换句话说,通过增加码分信道数目可以分担网络负载,能够有效地改善网络的吞吐量性能。当 $M=32$ 时扩频增益 N 对网络吞吐量的影响如图8所示。由图可知,单纯的通过改变扩频增益只能有限地改善网络吞吐量。当 $N=31, 63, 127$ 值时,网络吞吐量几乎相等, N 的增加并没有得到明显的吞吐量增益。

如图9所示为 $N=127$ 时系统的归一化时延性能。由图可知,码分信道数目对网络时延的影响很大。其原理类似于图7,系统中必须提供足够多的码组数目来分担网络负载,从而获得理想的延时性能。取 $N=127, M=64$ 时,网络时延接近极限,且数据延迟随网络负载的增加变化不大。

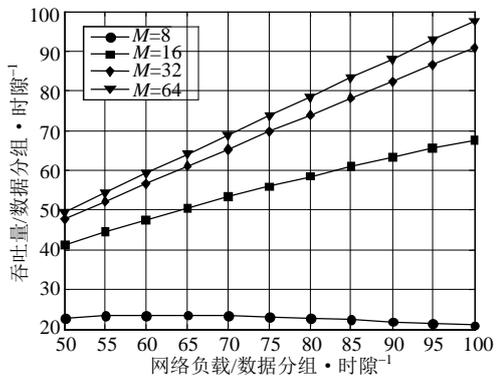


图7 M 对吞吐量的影响

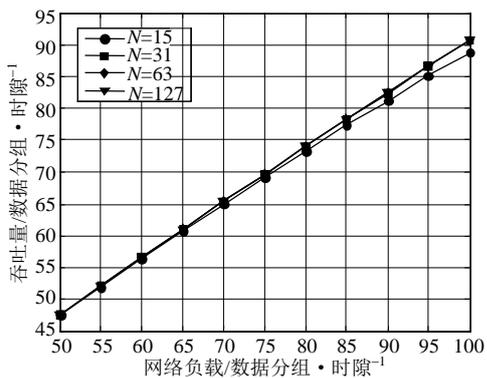


图8 N对吞吐量的影响

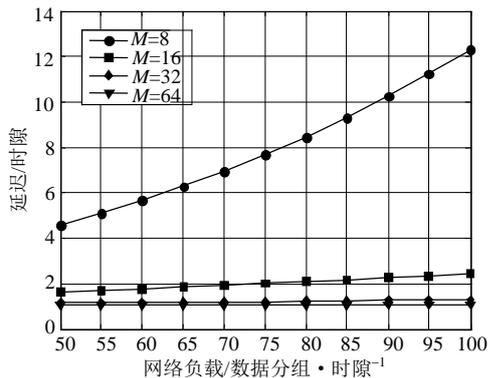


图9 M对网络延迟的影响

扩频增益 N 对时延的影响如图10所示,其中码分信道数 $M=32$ 。随 N 的增加时延有所改善,但当 $N=31$ 时,几乎达到极限,再增加 N 也不能获得明显的时延增益。

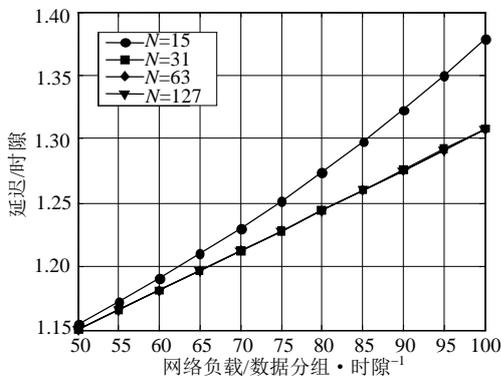


图10 N对网络延迟的影响

通过仿真分析基于移动蜂窝模型的多址接入性能以及几个重要参数 M 、 N 、 L 等的变化对多址接入性能的影响表明,增加码分信道数目 M 对多址接入性能的影响最大,分组长度 L 、扩频增益 N 对数据分组的成功传输概率有轻微影响,进而间接影响了吞吐量和网络时延。然而,事物均具有两面性,当参数的改变为系统性能带来增益的同时,也产生了一些负面效应。码分信道数目 M 的增大,一方面由于实际扩频码正交特性的不理想,会产生严重的多址

干扰;另一方面,为了满足网络中有足够多的合格扩频序列可用,增加 M 的前提是必须增加扩频序列的长度,这样会导致数据传输效率降低。数据分组 L 的减小会提高网络的成功传输概率,而这样同时也会导致系统开销增加,同样存在数据传输效率问题。

从仿真过程中注意到,扩频增益 N 对网络性能影响并不明显。分析式(3)~式(5)以及式(9)、式(14)可知, N 对网络性能的影响是通过系统的误比特率、成功传输概率间接引起的,而在只考虑多址干扰的情况下,扩频增益 N 对系统的误比特率影响并不明显。这一点可以由图11来说明。如图11所示为在高斯噪声条件下(当扩频序列理想正交时,可以假设多址干扰为高斯噪声)扩频增益和误比特率关系曲线,由图可知当 N 由15增加至127时,对系统误比特率的影响不大;这一点也进而反映在图5中,当 N 由15增加至127时,分组发送成功率最大仅仅相差0.02,这对网络的吞吐量和信息时延不会产生太大的影响。

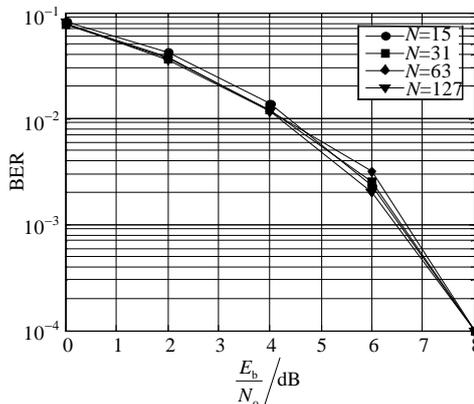


图11 N对系统误比特率的影响

6 结论

本文针对武器协同数据链的多址接入需求,提出了移动蜂窝模型。在此基础上,提出了一种基于离散FDM的FH/CDMA相结合的多址接入方式。通过对系统的分组发送成功概率、吞吐量、延时等性能的分析,以及仿真和数值计算可以证明,这种多址方式具有较好的性能,能够满足武器协同数据链的多址接入需求。

参考文献

[1] GHANADAN R, TUFANO P, HSU J. Flexible access secure transfer (FAST) tactical communications waveform for airborne networking[C]//IEEE CNF Milcom. Atlantic, New Jersey: IEEE Press, 2005: 1167-1173.
 [2] 孙诗东, 聂景楠. 扩频ALOHA多址系统吞吐量和时延性能分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1251-1254.

(下转第997页)