

doi: 10.7690/bgzd.2014.05.013

MIMO-OFDM 技术在无人机数据链中的仿真运用

李晓明¹, 王凤春²

(1. 陆军军官学院无人机系, 合肥 230031; 2. 陆军军官学院研究生管理大队, 合肥 230031)

摘要: 针对日益增长的无人机信息传输速率和可靠性要求, 对 MIMO-OFDM 技术在无人机数据链中的仿真运用进行研究。在分析 MIMO 和 OFDM 技术特点的基础上, 提出使用 MIMO-OFDM 技术的无人机数据链模型, 利用 Matlab 对采用 OFDM 技术的 MIMO 和 SISO 无人机数据链误码率性能进行仿真, 并指出下一步研究内容。仿真结果表明: 采用 MIMO-OFDM 技术可有效降低误码率, 克服码间干扰, 比传统 SISO 和单载波更加适合无人机通信。

关键词: MIMO-OFDM; 无人机; Matlab 仿真

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Simulation of MIMO-OFDM Technique in UAV Data Link

Li Xiaoming¹, Wang Fengchun²

(1. Department of UAV, Army Officer Academy, Hefei 230031, China;

2. Administrant Brigade of Postgraduate, Army Officer Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the more requirements of unmanned aircraft vehicle (UAV) information transmission rate and reliability, research on simulation of MIMO-OFDM in UAV data link. Based on analysis of technology features of MIMO and OFDM, put forwards MIMO-OFDM technology UAV data link model, use Matlab to simulate MIMO and SISO UAV data link bit error rate performances adopt OFDM technology, then give the further research content. The simulation results show that, use MIMO-OFDM technology can effectively reduces bit error rate, overcomes inter symbol interference, and is better suited to the UAV data link than the traditional SISO system and single carrier transmission technique.

Keywords: MIMO-OFDM; UAV; Matlab simulation

0 引言

无人机系统是近年来各国重点发展的侦察装备之一, 在战场侦察、情报获取、地形勘测、抗震救灾等方面具有广泛的军事、民用和科研价值。数据链是无人机系统的重要组成部分, 主要完成地面站遥控指令传输、飞机飞行状态信息和图像视频采集与传送的任务。传统的无人机数据链采用单发射机、单接收机的信息传输模式。随着电磁环境的复杂, 对无人机信息传输速率和可靠性提出了更高要求。

多输入多输出正交频分复用 (multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing, MIMO-OFDM) 技术能够大幅度提高系统的频谱利用率, 增强抗多径衰落能力, 又可以通过空间分集对抗频率选择性衰落, 提高信息传输可靠性^[1]。笔者首先分析了采用 MIMO-OFDM 技术的无人机数据链, 然后利用 Matlab 软件进行了误码率的对比仿真研究。

1 基于 MIMO-OFDM 技术的无人机数据链

1.1 MIMO-OFDM 无人机数据链的构成

在无人机数据链中增加 MIMO-OFDM 技术时,

假设 OFDM 调制采用 M 个子载波, 发射端有 X 个天线, 接收端有 Y 个天线, 数据链发射端、接收端组成框图如图 1、图 2 所示。

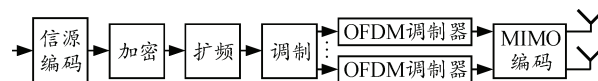


图 1 MIMO-OFDM 无人机数据链发射端原理

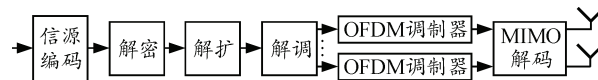


图 2 MIMO-OFDM 无人机数据链接收端原理

在发射端, 信号经信源编码、加密、扩频、调制等处理, 经 IFFT 变换成 OFDM 符号矩阵、添加循环前缀, 进入 MIMO 编码器进行编码后, 送至 X 个发射天线发送出去。

在接收端, 信号由 Y 个天线进行接收, 根据具体的编码方案将收到的信号作相应的检测解码, 进行 OFDM 解调, 经时频同步、去除循环前缀、FFT 变换, 然后将此频域信号经过与发送端相对应的解调、解扩、解密、信源解码后, 得到原始的信息。

在无人机信号传输过程中, 多径效应和频率选择性衰落是影响信号传输质量的一个重要因素。而在无人机数据链中采用 MIMO 技术时, 通过设置多

收稿日期: 2013-12-04; 修回日期: 2014-01-31

基金项目: 陆军军官学院院基金项目 (2012XYJJ-051)

作者简介: 李晓明 (1982—), 女, 山东人, 硕士, 讲师, 从事无人机数据链与通信工程研究。

个空间相分离的天线,可充分利用这种多径效应,把每条路线视为创建多重虚拟线路的单个信道,每个信道均可用于传送信号。这种技术体制降低了单一数据流量,提高了数据传输速率,可在不额外占用频谱资源的情况下,有效延长侦察信息传输距离,拓展天线的覆盖范围。

OFDM 技术是将串行的高速数据变换成多路相对低速的并行数据,利用相互正交的子载波进行调制,允许各个子信道的频谱相互重叠,因此频谱利用率相对较高,能有效减小多径衰落和码间干扰的影响,只要保护间隔大于信道的时延扩展,即可以完全消除码间干扰。

在无人机信息传输过程中,上行、下行链路对信号的传输速率和误码率的要求是不同的,而传统数据链采用的扩频通信方式中每条链路的信号调制方式必须相同,不能在频谱效率和误码率之间获得最佳平衡。而数据链如果采用 OFDM 技术,每个子载波就可以进行独立调制,例如下行视频和图像信息可采用高阶调制以获得最大频谱效率,上行协同控制信息可选择低阶调制来确保信噪比。

1.2 MIMO-OFDM 无人机数据链优势分析

1.2.1 信道容量的提升

无人机 MIMO-OFDM 数据链将多径信道与发射端、接收端视为一个整体进行优化,从而可实现更高的系统容量和频谱利用率,相当于一种近于最优的空时域联合的分集和干扰对消处理。假定信道为独立的瑞利衰落信道,则信道容量可近似表示为:

$$C = [\min(M, N)] B \log_2(\rho/2) (\text{bit/s}) / \text{Hz} \quad (1)$$

式中: M 为发射天线数目; N 为接收天线数目; B 为信道带宽; ρ 为接收端信噪比; $\min(M, N)$ 为 M 、 N 的较小者。

上式表明:在接收端信噪比和信道带宽一定时, MIMO-OFDM 数据链的最大容量随最小天线数的增加而线性增加^[2]。

1.2.2 传输性能的改善

数据链采用 MIMO-OFDM 技术后,可以通过 MIMO 发射端、接收端获取分集增益,通过 OFDM 调制提高频谱利用率,通过编码冗余在信道中传送编码增益,因此在衰落信道中分集增益和编码增益都有所提高。在衰落信道中,当信噪比较高时,同时使用编码和分集的 MIMO-OFDM 数据链的误码率可近似计算为:

$$P_e = \frac{c}{(\gamma_c \rho)^M} \quad (2)$$

式中: c 为系统调制方式和无线信道特性所决定的比例常量; γ_c 为编码增益; M 为系统的分集重数。

分集增益引起的信噪比优势随着分集重数的增加和目标错误率的降低而增加,编码增益在较高信噪比时通常是恒定的^[3]。

在无人机的高速运动中会产生多普勒频移,会破坏 OFDM 子载波的正交性,导致系统性能有所下降,但经过计算可知影响较小。例如假设某型无人机最大相对速度为 220 m/s,载频为 5 GHz,最大多普勒频移为 3 700 Hz,系统性能将下降 2 dB。因此,将 MIMO-OFDM 技术应用于无人机数据链将是提高系统传输性能的一个很好选择。

2 MIMO-OFDM 无人机数据链性能仿真

2.1 无人机通信信道的 WSSUS 模型

无人机通信信道是一种无线时变衰落信道,可采取一种对衰落现象进行建模的简单方法,即小规模衰落信道的宽平稳不相关散射 (wide-sense stationary uncorrelated scattering, WSSUS) 模型。在该模型中,经过不同时延到达接收天线的信号被认为是互不相关的。讨论了多普勒功率谱和延迟功率谱的构成,可以近似认为二者是相互独立的,其中多普勒功率谱服从标准的 Jakes 分布^[4]。由于无人机和地面站的相对移动会造成传输路径的变化,该模型存在时变特性。如果只存在大量反射路径而不存在视行信号分量,此时的小规模衰落称为瑞利衰落,接收信号的包络服从瑞利分布;若存在没有衰落的视行信号分量,则接收信号小规模衰落的包络服从莱斯分布^[5]。

无人机地面站使用的测控天线一般是高增益的定向天线,因此,必然存在较强的视行信号分量。称视行分量能量 a^2 与地面反射、散射分量能量之和 c^2 的比值为莱斯因子 $k=a^2/c^2$,当 $k > 20$ dB 时,信道近似为高斯信道;当 $k < -20$ dB 时,直射分量很小,莱斯衰落退化为瑞利衰落,实际中 k 的取值一般为 10~20 dB^[6]。

一般选取由视行路径、基于地面的反射路径和散射路径组成的三径模型来描述实际信道。其中,反射分量是视行分量幅度的 20%~80%;散射分量幅度更小,能量损耗为 10~20 dB^[7]。信道模型的冲击响应 $h(t)$ 为:

$$h(t) = a_0\delta(t) + a_1 \exp(j\Delta\theta_1) \exp[j\Delta\omega_{d,1}(t - \tau_1)] \cdot \delta(t - \tau_1) + \varepsilon(t) \exp[j\Delta\omega_{d,2}(t - \tau_2)] \delta(t - \tau_2) \quad (3)$$

式中： a_0 是视行分量的幅度； a_1 是反射分量的幅度； $\Delta\theta_1$ 是相对视行分量的相移； $\Delta\omega_{d,1}$ 和 $\Delta\omega_{d,2}$ 分别是反射分量和散射分量的多普勒频移； τ_1 和 τ_2 分别是反射分量和散射分量相对视行分量的时延；散射分量由不规则的地形引起，它的幅度和时延具有很大的随机性。幅度可用 0 均值的高斯复随机变量 $\varepsilon(t)$ 来描述^[8-9]。

2.2 无人机 MIMO-OFDM 数据链仿真结果

通过对无人机飞行状态的分析 and 典型参数选取，对无人机数据链在 OFDM 方式下采用多天线和

单天线的性能进行误码率的 Matlab 仿真，即无人机数据链中增加 OFDM 调制方式后，在相同条件下，每个子载波采取不同调制方式 (QPSK、BPSK、16QAM) 时，无人机数据链采取 MIMO 技术和传统 SISO 的误码率性能进行比较。

2.2.1 仿真参数选取

仿真过程界面如图 3 所示。

右侧为仿真参数选取界面，如图 4 所示，可选择参数主要有 OFDM 保护间隔、符号周期、数据符号周期、信噪比、卷积码码率、调制方式和信道类型等，通过此对话框，可根据无人机任务执行不同阶段选取不同参数进行性能仿真。

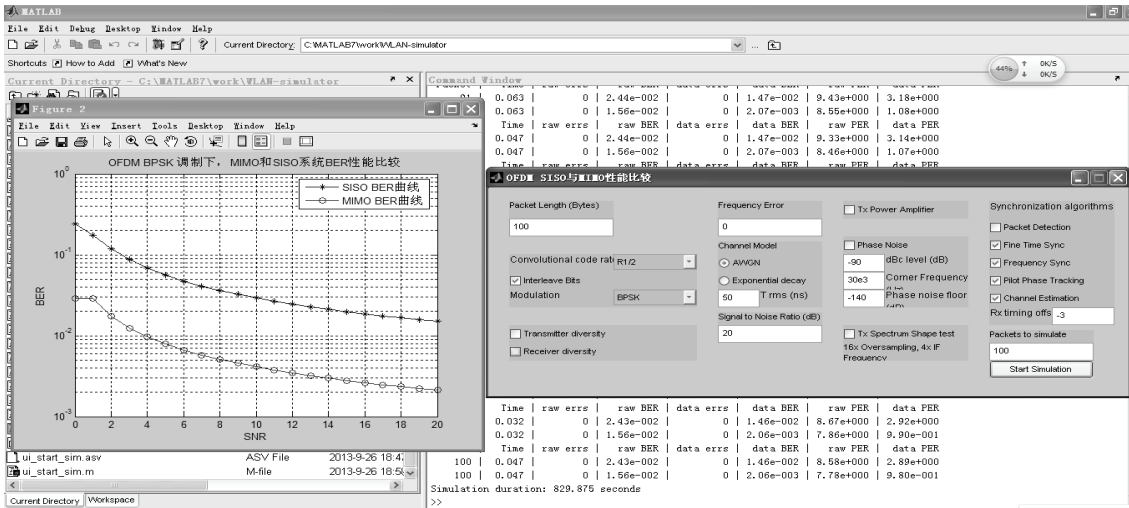


图 3 仿真过程界面

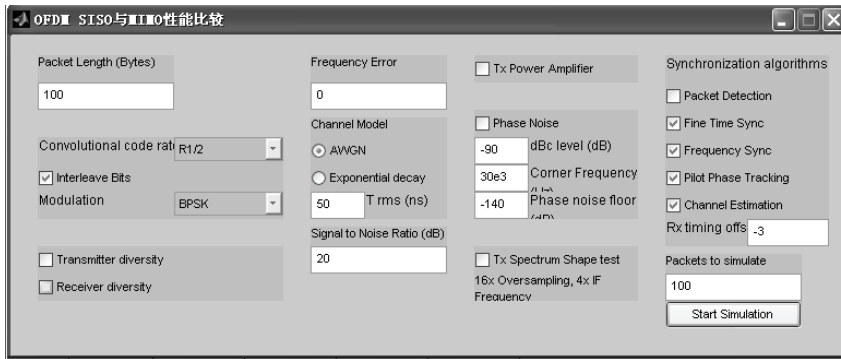


图 4 仿真参数选取界面

本次仿真选取的参数为 OFDM 系统参数，采用 64 点的 IFFT 实现，保护间隔 $T_g=5 \mu s$ ，数据符号周期取 $T_{FFT}=20 \mu s$ ，OFDM 符号周期 $T_s=25 \mu s$ ，子载波频率间隔 50 kHz，数据速率取 2 Mb/s。

卷积码码率可选项为 1/2、2/3、3/4，仿真时选取了码率为 1/2，约束长度为 7 的卷积码编码，生成矢量为 [133, 171]，采用维特比判决译码，回溯长度为 96。

调制方式选取无人机数据链经常采用的 QPSK、BPSK 和 16QAM 方式，每个子载波携带 1 bit 的信息，因此每个符号需 50 个子载波，剩余 14 个子载波用于过采样。带宽设置为 2.5 MHz，信道选取高斯信道。对应 5 μs 的保护间隔，由 16 个子载波组成循环前缀 CP，载频取 2.4 GHz。MIMO 天线设为三副发射天线，三副接收天线，即三入三出。参数的具体选取方法见文献 [10]。

2.2.2 仿真结果分析

仿真结果如图 5~图 7 所示。

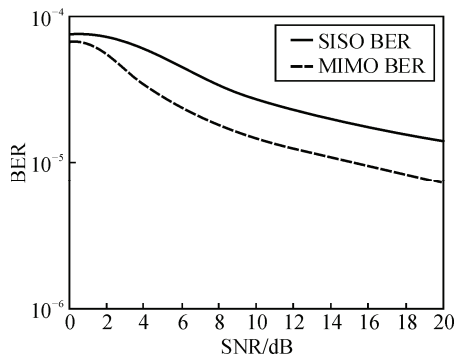


图 5 OFDM QPSK 调制方式下 MIMO 和 SISO 性能对比

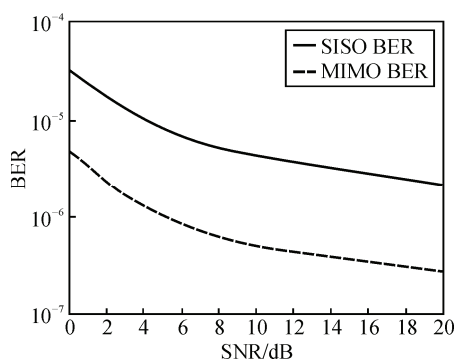


图 6 OFDM BPSK 调制方式下 MIMO 和 SISO 性能对比

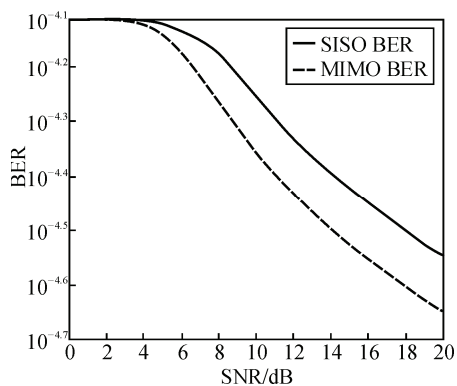


图 7 OFDM 16QAM 调制方式下 MIMO 和 SISO 性能对比

1) 无人机数据链增加 OFDM 调制方式, 各子载波采取 QPSK 时, 传统 SISO 和 MIMO 天线的误码率性能对比如图 5 所示。可见, 采用 MIMO 天线时误码率性能明显优越于 SISO 系统, 但 SNR 较小时二者误码率性能差别不大, 随着输入信噪比的提高, 采用 MIMO 天线时误码率明显改善, 输入信噪比大于 8 dB 时, 下降为 SISO 系统误码率的一半。

2) 子载波如采取 BPSK 调制方式, MIMO 系统的误码率优越性更为明显, 误码率为 SISO 系统的 1/10, 如图 6 所示。

3) 子载波如采取 16QAM 调制方式, 输入信噪比小于 5 dB 时, MIMO 系统误码率性能无明显改

善, 随着输入信噪比的增加, 误码率下降至 SISO 系统的 80%, 如图 7 所示。

4) 对比图 6 和图 7 可知, 如数据链同样采取 OFDM 调制, 子载波采用 BPSK 的误码率性能要明显好于 16QAM。

3 下一步研究内容

根据前期研究工作和性能仿真结果, 拟开发相应硬件设备, 依托本单位的小型无人机进行飞行试验, 对 MIMO-OFDM 技术在无人机数据链中的应用进行验证。机体平台为上单翼、双尾撑、双垂尾和后置发动机气动布局, 如图 8、图 9 所示。原配置的数据传输测控设备包括数传设备和图传设备, 数传设备兼具遥测、遥控功能, 可实时上传无人机的飞行参数和设备工作状态, 并上传任务规划信息。图传模块是模拟传输体制, 主要用于实时的图像传输, 便于对目标的分析和航路规划。如在该飞行平台上搭载 MIMO-OFDM 模块, 可实现数据和图像的数字传输, 减小设备体积, 提高传输速率和质量, 对无人机数据链的改进具有重要意义。



图 8 小型无人机静态照片



图 9 小型无人机起飞照片

4 结束语

笔者建立了采用 MIMO-OFDM 技术的无人机数据链模型, 给出了无人机数据链采用不同调制方式时的性能对比, 分析了采用 MIMO 技术和传统 SISO 的误码率性能。通过分析可知, OFDM 的性能

明显优于传统单载波调制。OFDM 利用串并变换降低了码元速率，对多径传播造成的 ISI 具有一定的抑制作用，通过在每个符号的前端插入保护间隔，使其具有更强的抗多径衰落、码间干扰能力。同时采用 MIMO 技术，可有效降低误码率，提高信息传输质量。

参考文献:

[1] 刘学勇. 详解 Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 258-261.
 [2] Fozunbal M, Mclaughlin SW, Schafer RW. On space-time-frequency coding over MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2005, 12(4): 320-331.
 [3] Lee K F, Williams D B. A space-time coded transmitter diversity technique for frequency selective fading channels[J]. Proc.IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Cambridge, MA, March 2000, 32(6): 149-152.

[4] Haas Erik. Aeronautical channel modeling[J]. IEEE Trans On Vehicular Technology (S0018-9545), 2002, 51(2): 254-264.
 [5] Bernard Sklar. 数字通信基础与应用[M]. 徐平平, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 151-153.
 [6] Rice Michael. Narrowband Channel Model for Aeronautical Telemetry[J]. IEEE Trans On Aerospace and Electronic Systems(S0018-9251), 2000, 36(4): 1371-1377.
 [7] Rice Michael. Wideband Channel Model for Aeronautical Telemetry[J]. IEEE Trans On Aerospace and Electronic Systems(S0018-9251), 2004, 40(1): 57-69.
 [8] 李瑾, 杨贻嘉, 荣嵘, 等. 多径瑞利衰落信道下一种改进的分布式 MIMO-OFDM 符号定时同步算法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(12): 23-27.
 [9] 邹春海, 刘广武. OFDM 技术在无人机通信中的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10): 2293-2295.
 [10] 刘学勇. 详解 Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 258-261.

(上接第 31 页)

2.7 作战信息交换矩阵

信息交换矩阵描述了信息交换的信息要素以及相关属性。以舰载弹炮结合防空武器对空防御作战

为例，图 7 确定了预警雷达节点、搜索雷达节点、系统指挥节点、火力控制节点、跟踪雷达节点、近程导弹节点、高射速舰炮节点，即可确定出舰载弹炮结合防空武器系统防空作战时各节点间的信息交换矩阵，如表 2 所示。

表 2 作战信息交换矩阵

需求线	节点连接关系	起始节点名称	终止节点名称	完成的信息交换
1	命令指示	系统指挥节点	预警雷达节点	警戒保障需求; 警戒任务; 警戒方向等
2	情况上报	预警雷达节点	系统指挥节点	警戒区域海空情况等
3	命令指示	系统指挥节点	火力控制节点	下达打击任务
4	情况上报	火力控制节点	系统指挥节点	任务准备情况, 装备情况; 完成任务情况等
5	命令指示	火力控制节点	近程导弹节点	下达目标指示, 解算目标参数, 发射命令等
6	情况上报	近程导弹节点	火力控制节点	射击情况, 消耗弹药情况
...

2.8 作战体系结构模型验证

根据舰载弹炮结合防空武器系统基于 DoDAF 建模过程中所形成的数据模型、活动模型，完成可执行模型的构建，笔者采用 Petri 网方式对舰载弹炮结合防空武器系统体系结构可执行模型进行验证，结果与预期一致。符合舰载弹炮结合防空武器系统军事需求和设计要求。

3 结束语

笔者采用 DoDAF 开发标准，在分析水面舰艇末端防御要求基础上，完成了舰载弹炮结合防空武器系统作战视图的分析与设计，阐明了舰载弹炮结合防空武器系统的角色、组成、活动，描述过程明晰，模型易于各级设计者沟通理解，可对推动舰载弹炮结合防空武器系统顶层设计和风险控制提供技术支撑。

参考文献:

[1] 冯忠国, 钟声新, 朱传伟. 舰载弹炮结合近程防空武器系统研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(5): 32-41.
 [2] 张维明, 陈洪辉, 余滨, 等. 军事信息系统需求工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 21-26.
 [3] 王伟, 徐照磊, 王晓楠. 基于 DoDAF 的网格环境下虚拟组织认证系统体系结构建模[J]. 计算机安全, 2011, 12: 2-6.
 [4] 黄维. 基于 Petri 网的弹炮协同防空流程优化研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2011.
 [5] 张少兵, 郭忠伟, 钱晓进, 等. 基于 DoDAF 的防空兵指挥信息系统作战体系结构[J]. 兵工自动化, 2011, 30(3): 18-20.
 [6] 戎光, 刘新发, 夏惠城. 基于 DoDAF 的大型水面舰艇编队防空反导系统作战体系结构[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(6): 22-25.