



一种停机位通信干扰抑制的自适应波束成形技术^{*}

徐浩煜¹, 周 晗¹, 汪亮友^{1,2}, 蔡孙增³, 朱正航³

(1. 中国科学院上海高等研究院航空通讯技术联合研究实验室 上海 201210;

2. 同济大学电子与信息工程学院 上海 210804;

3. 上海无线通信研究中心 上海 200335)

摘 要: 目前在最先进的商用飞机上, 基于 IEEE 802.11b/g 协议的航站楼无线局域网系统为停机位处高速无线数据传输提供了一个可行的解决方案。然而, IEEE 802.11b/g 协议并不被设计具有抗干扰性能, 当前停机位无线通信(指 airport gate link)系统受到机场强干扰影响只能提供较低的无线传输速率。提供了一个基于 IEEE 802.11g 协议的自适应波束成形技术来提高当前航站楼无线局域网系统的性能。仿真结果显示所提出的方法可以有效抑制干扰并有效改善系统性能。

关键词: 自适应波束成形; 干扰; IEEE 802.11g; 航站楼无线局域网; 停机位数据链

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.07.014

Interference Mitigation with Adaptive Beamforming in Airport Gate Link

Xu Haoyu¹, Zhou Han¹, Wang Liangyou^{1,2}, Cai Sunzeng³, Zhu Zhenghang³

(1. Joint Research Laboratory for Aviation Connectivity Technologies,

Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Science, Shanghai 201210, China;

2. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 200335, China)

Abstract: On the current most advanced commercial airplanes, IEEE 802.11b/g based system-terminal wireless LAN (TWLN)-is a wireless solution that is able to support the high speed wireless transmission for gate link. However, IEEE 802.11b/g has no resistibility against interference; due to the strong co-channel interference at the airport, the current gate link system provides a very low data rate. An IEEE 802.11g based adaptive beamforming method was provided that improved the performance of the current TWLN system. The simulation shows the proposed method is able to reject interference and significantly improve the system performance.

Key words: adaptive beamforming, interference, IEEE 802.11g, terminal wireless LAN network, airport gate link

1 背景

随着新型民用航空飞行器日益智能化,其数字化程度逐渐加大,机载设备所存储的数据也日益庞大。当前中国民

航系统主要的无线通信手段是采用飞机通信寻址与报告系统 (aircraft communication addressing and reporting system, ACARS)与 VHF digital mode 2 (VDL mode 2)传输到地面设施。受限制于这两种方式的传输速率^[1-3],当前的无线通信

^{*} 中国科学院上海高等研究院与波音(中国)投资有限公司基金资助项目(No.Y042281E02)

手段无法满足目前和未来机载设备的大容量数据传输。现代新型民用航空客机(如波音 777 与 787)搭载终端无线局域网设备(Terminal wireless LAN unit, TWLU)^[4,5]与廊桥无线接入点组成停机无线通信系统,使飞机在机场停机位停靠时,通过高速无线传输机载数据到地面网络,如图 1 所示。

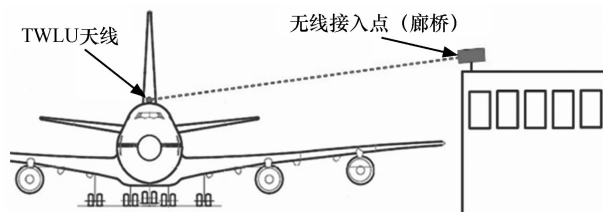


图 1 停机位无线通信系统

然而, TWLU 所使用的频段是面对 Wi-Fi 等设备开放的免费公用频段。大型民航机场中, 针对不同服务的无线网络应用繁多, 无线设备布网十分密集。不同无线设备的服务提供商不同导致无线频率使用没有统一规划, 同频段信道的设备互相干扰严重。由于 TWLU 采用 IEEE 802.11b/g^[5] 无线传输协议, 并无抵抗同频干扰的设计, 目前新型飞机无法改装升级 TWLU 无线传输技术, 使得当前停机位无线通信系统无法解决针对干扰的问题。由于以上种种原因使得在机场廊桥处使用 TWLU 设备工作时接入困难, 数据传输不稳定, 吞吐量低。

针对以上问题, 本文根据 IEEE 802.11g 协议特点提出了一种适用该协议的智能天线系统的自适应波束成形技术, 即利用 IEEE 802.11g 协议长训练序列来计算波束成形合并权值, 并通过连续不同帧训练序列实现实时的权值更新, 最后通过仿真验证了该方法, 从而最终为改造廊桥处设备而非机载设备以解决飞机停靠在廊桥处无线通信抗干扰问题提供理论依据。

2 自适应波束成形技术

下面将阐述研究工作的主要内容, 就研究工作的入手点、理论模型版算法原理进行介绍。

2.1 设计思路

本文主要讨论在 IEEE 802.11g 中正交频分复用 (OFDM) 技术下的自适应波束成形技术, 因此在这里仅描述相关的 IEEE 802.11g 物理层技术内容。图 2 所示为 IEEE 802.11g 协议的物理层数据单元 (PPDU) 帧结构^[6,7], PPDU 数据单元分为 3 部分: PLCP 前导序列 (PLCP preamble)、信号域和数字域。PLCP 前导序列是用于信号检测、自动增益控制、频偏估计、粗同步与精同步等; PLCP 前导序列由 10 个短训练序列与 2 个长训练序列组成, 并且这些训练序列是固定不变的^[7]。本文所涉及智能天线技术将利用 PLCP 中 2 个长训练序列固定不变的特点, 通过用已知训练序列与多天线接收机接收到实际的训练序列信号, 计算多天线合并权值, 从而实现基于 IEEE 802.11g 的自适应波束成形技术。

2.2 所用信号模型与干扰模型

为了简单化, 这里假设期望信号为平面波抵达天线, 天线为线阵且间距为 D , 天线数为 N , 信号入射方向为 θ , 中

$$\text{心频率为 } f, \text{ 天线系统的来波方向矢量为: } a(\theta) = \begin{bmatrix} a_1(\theta) \\ a_2(\theta) \\ \vdots \\ a_N(\theta) \end{bmatrix}, \text{ 其}$$

中 $a_n(\theta) = e^{-j2\pi \frac{1}{c} (n-1) D \sin \theta}$ 。令期望接收信号为 $d(t)$, 其信号来波方向为 θ_d , 同时有 I 个来自其他方向的干扰信号 $m_i(t)$, 其来波方向为 θ_i 。

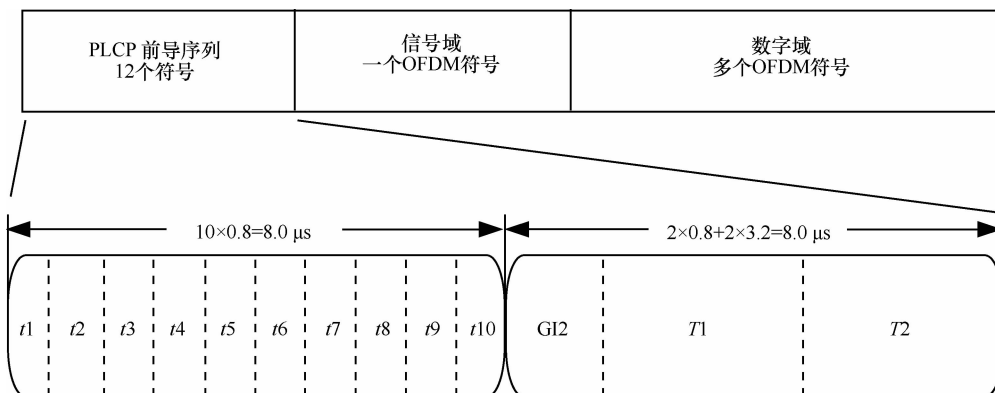


图 2 IEEE 802.11g 帧结构与前导序列帧结构^[6]



另外,第 n 个阵元上的加性白噪声为 $n_n(t)$, 其方差为 σ^2 , 那么第 n 个阵元所接收到的信号可以表示为:

$$x_n(t) = a_n(\theta_d)d(t) + \sum_{i=1}^I a_n(\theta_i)m_i(t) + n_n(t) \quad (1)$$

那么矩阵形式表达为:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = [a(\theta_d), a(\theta_1), \dots, a(\theta_I)] \begin{bmatrix} d(t) \\ m_1(t) \\ \vdots \\ m_I(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_n(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d(t) \\ m_1(t) \\ \vdots \\ m_I(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_n(t) \end{bmatrix}$$

简化为:

$$x(t) = A s(t) n(t) = a(\theta_d)d(t) + \sum_{i=1}^I a(\theta_i)m_i(t) + n(t) \quad (2)$$

2.3 算法描述

自适应波束成形技术的系统结构如图 3 所示, N 个阵元天线构成阵元的输出信号 $x_n(t)$, 经过 A/D 转换后成为离散基带信号, w_n^* 为 w_n 共轭, 表示对第 n 路阵元信号的权值, 那么, 输出信号 $y(t)$ 可以表示为:

$$y(t) = w^H x(t) = \sum_{n=1}^N w_n^* x_n(t) \quad (3)$$

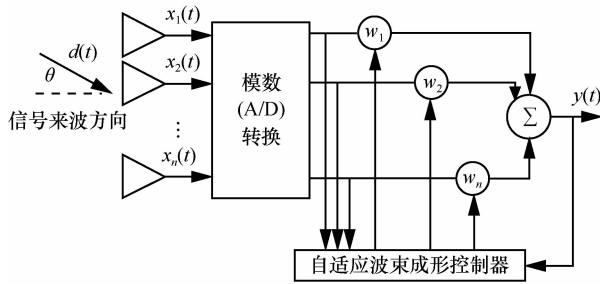


图 3 自适应波束成形技术的系统结构

令长训练序列为长度为 L , 那么基于 IEEE 802.11g OFDM 技术的期望接收信号可表示为: $d(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \text{preamble}(l) e^{-j2\pi k l / L}$ 。

本文中, 假设基带处理能找到用于精同步的两个长训练序列, 波束成形系统输出平均信号功率则为:

$$P(w) = E[|y(k)|^2] = E[|w^H x(k)|^2] = w^H a(\theta_d) |d(k)|^2 +$$

$$\sum_{i=1}^I E[|m_i(k)|^2] |w^H a(\theta_i)|^2 + \sigma^2 \|w\|^2 \quad (4)$$

其中, $x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$ 。

2.3.1 最大比合并算法

在多天系统, 最大比合并是比较常用且简单的算法。由于本文系统架构也可实现最大比合并, 所以这里简述一下最大比合并算法以说明之后性能上差别的原因, 并在后面的仿真中给出性能差距。最大比合并算法是将多天信号合并问题归结为寻找实数合并向量, 使得合并后的信号噪声比 (SNR) 最大, 各路合并系数为各路期望信号幅度比^[8-10], 即:

$$w = r_{sd} = E[x(k) d^H(k)] \quad (5)$$

2.3.2 自适应波束成形算法

从式 (4) 中可知为了达到最佳输出信号与干扰加噪声比 (SINR), 波束成形问题即变为优化问题, 通过寻找权向量, 使接收信号加权求和后输出与期望信号平均误差最小, 即通过最小均方误差 (MMSE) 方法就可以实现求出抑制干扰与噪声的最优加权值:

$$\min_w E[|y(k) - d(k)|^2] = \min_w E[|w^H x(k) - d(k)|^2] \quad (6)$$

那么令 $\frac{\partial}{\partial w} E[|w^H x(k) - d(k)|^2] = 0$, 得到:

$$w = R_x^{-1} r_{sd} \quad (7)$$

其中, $R_x = E[x(k) x^H(k)]$ 是矢量的自相关矩阵, r_{sd} 是 $x(k)$ 与期望信号 $d(k)$ 的互相关矢量: $r_{sd} = E[x(k) d^H(k)] = E[a(\theta_d) d(k) d^H(k)] + E[\sum_{i=1}^I a(\theta_i) m_i(k) + n(k)] d^H(k)] = a(\theta_d) E[d(k) d^H(k)] + E[\sum_{i=1}^I a(\theta_i) m_i(k) + n(k)] d^H(k)]$ 。

由于 MMSE 方法需要对矩阵求逆, 并且无线传输环境是时变的, 因此为了保持自适应波束成形技术性能及时有效, 权向量需要保持不断的更新。使用最小均方 (LMS) 算法^[11-13], 如下:

$$y(k) = \hat{w}^H(k) x(k) \quad (8)$$

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (9)$$

$$\hat{w}(k+1) = \hat{w}(k) + \mu x(k) e^*(k) \quad (10)$$

其中, μ 为收敛因子, $0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}}$, $\lambda_{\max}$ 为 R_x 最大特征值。

3 数据分析

3.1 仿真环境描述

为了验证本文提出自适应波束成形算法的性能与有

效性,本文搭建了一个基于 C 语言的 IEEE 802.11g 协议物理层技术仿真平台,整个仿真系统的主要参数见表 1。

表 1 仿真主要参数

系统仿真参数	数值
系统带宽	20 MHz
抽样速率	40 MHz
数据/导频子载波数/FFT 点数	48/4/64
子载波间隔	312.5 kHz
OFDM 符号长度	4.0 μ s
数据长度	200 byte
数据分组总数	1 000
调制方式	BPSK
信道编码方式	卷积码,码率=1/2
天线结构	1 $\times$ 4 线阵($N=4$),天线间隔半波长
SIR	3 dB, 0 dB, -3 dB, -6 dB, -9 dB
信道特征	高斯白噪声信道

3.2 算法收敛性

为了实现自适应波束成形权值及时更新,LMS 算法必须在相应的时间(8 μ s)内达到收敛,图 4 所示为 LMS 算法在所用长训练序列采样点数范围(6.4 μ s)内收敛情况,由图可知,自适应波束成形的权系数通过 IEEE 802.11g 协议长训练序列可以得到稳定的收敛值。

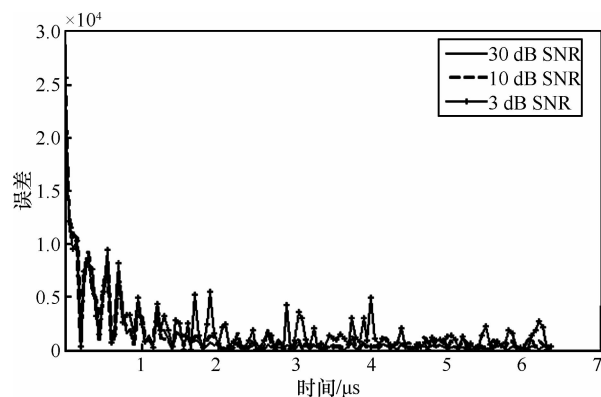


图 4 自适应波束成形权值收敛性能

图 5 所示为算法收敛后各个天线所得权系数构成的天线阵方向,仿真信号源来波方向为 0° ,干扰源的来波方向为 30° ,由天线阵方向可知,自适应波束成形技术算法在干扰源来波方向形成了近 17 dB 零陷,很好地抑制了干扰源信号。

3.3 仿真结果分析与算法比较

图 6 所示为天线数 $N=4$ (即 4 天线)时,自适应波束成形技术在高斯白噪声信道下不同信噪比(E_b/N_0)以及干扰强度下的误码率性能曲线。由图可知,采用 4 天线的 LMS

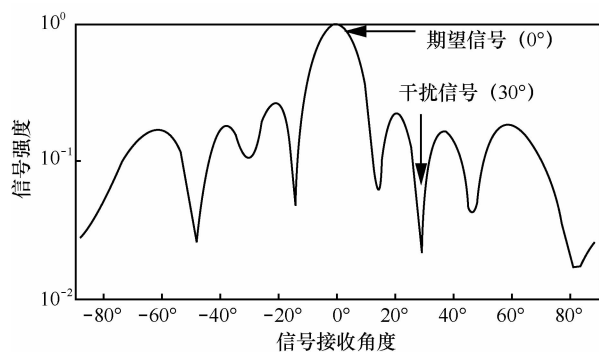


图 5 自适应波束成形天线阵方向图

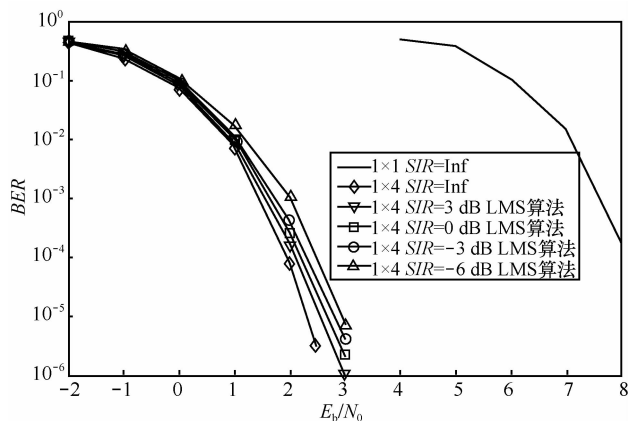


图 6 波束成形性能

算法的自适应波束成形技术可以提高将近 6 dB 增益,并且在有强干扰的情况下(信号干扰比(SIR)分别为 3 dB, 0 dB, -3 dB 与 -6 dB),误码率性能虽与无干扰仿真曲线相比略有下降,但是仍有良好的抑制干扰性能。

图 7 所示为 4 天线基于 LMS 的自适应波束成形技术与最大比合并(MRC)在高斯白噪声信道下不同信噪比(E_b/N_0)以及干扰强度下的误码率性能曲线。由图可知,常见的 MRC 技术并不具备很好的抗干扰,尤其在干扰信号强度接近甚至超过有用信号强度时,MRC 技术性能就很

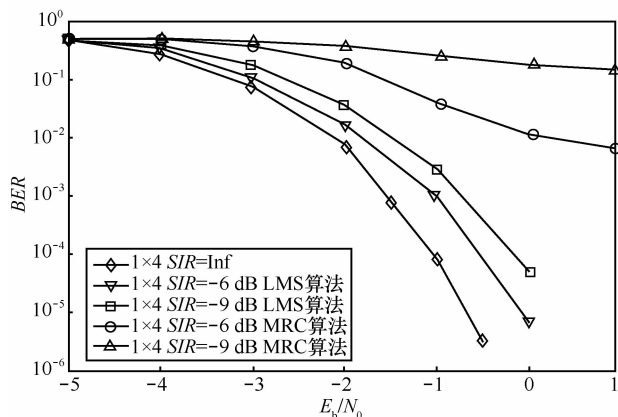


图 7 不同信噪比与不同干扰强度下误码率曲线



快开始下降;在 $E_b/N_0=0$ dB、 $SIR=-9$ dB 时,本文自适应波束成形技术可以使系统保持在误码率为 10^{-4} 下运行,而与此同时运用 MRC 系统已经不能正常工作,可见本文所提出的自适应波束成形算法性能有一定的优越性。

4 结束语

主要对现代民航停机位无线通信系统中停机坪处有干扰情况下的无线传输系统进行了研究,就有干扰无线局域网环境(IEEE 802.11g 协议)中的接收技术做了深入探索,并结合协议特点提出了适用的自适应波束成形技术算法,然后从仿真上论证了所提出算法的抗干扰性能。

致谢: 本文的研究受到中国科学院上海高等研究院与波音(中国)投资有限公司基金项目支持,十分感谢在研究过程中来自波音公司的建议与大力支持。

参考文献

- 1 ARINC Specification 618-5. Air/Ground Character-oriented Protocol Specification Chapter 4.0, 2000
- 2 ICAO. VHF air-ground digital link (VDL), International Standards and Recommended Practices, 2001
- 3 ICAO Doc 9776. Manual on VHF Digital Link (VDL) Mode 2, 2001
- 4 ARINC Characteristic 763-3. Network Server System (NSS), 2005
- 5 ARINC Specification 822-1. Aircraft/Ground IP Communication, 2008
- 6 IEEE Std 802.11g-2003. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz, 2003
- 7 IEEE Std 802.11a-1999. Part 11: wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications: High-speed physical layer in the 5 GHz, 1999
- 8 Brennan D G. Linear diversity combining techniques. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(2):331~356
- 9 Tokgoz Y, Rao B D. The effect of imperfect channel estimation on the performance of maximum ratio combining in the presence of cochannel interference. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(5):1527~1534
- 10 Kyung-Seung A, Heath R W. Performance analysis of maximum ratio combining with imperfect channel estimation in the presence of cochannel interferences. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1080~1085
- 11 Widrow B. Adaptive filters I: fundamentals. Stanford Electronics Labs Rept SEL-66-126 (Tech Rept 6764-6), December 1966
- 12 Kawitkar R S, Wakde D G. Smart antenna array analysis using

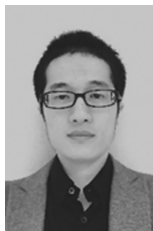
LMS algorithm. Proceedings of IEEE Int Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, China, 2005

- 13 Ali W A E, Mohamed D A E, Hassan A H G. Performance analysis of least mean square sample matrix inversion algorithm for smart antenna system. Proceedings of Antennas and Propagation Conference (LAPC), Loughborough, UK, 2013

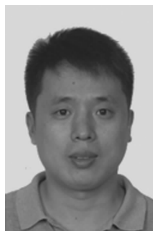
[作者简介]



徐浩煜,男,中国科学院上海高等研究院航空通讯技术联合研究实验室副研究员、实验室主任,主要研究方向为无线通信、大数据处理。



周晗,男,中国科学院上海高等研究院航空通讯技术联合研究实验室助理研究员,主要研究方向为移动无线通信小区干扰协调、阵列信号处理、空对地通信。



汪亮友,男,同济大学电子与信息工程学院博士生,中国科学院上海高等研究院航空通讯技术联合研究实验室高级工程师,主要研究方向为通信网络、人工智能、软件工程和无线通信技术等。



蔡孙增,男,上海无线通信研究中心、上海微系统与信息技术研究所博士生,主要研究方向为无线通信物理层信道估计均衡、同步等算法及可见光通信系统中的非线性后失真算法。



朱正航,男,上海无线通信研究中心工程师,主要研究方向无线通信系统物理层算法研究与原型系统设计实现。

(收稿日期:2014-01-22)