两飞行器间无线数据链通信区域建模

余伏章 蔡志勇 胡颖琼

(洪都航空工业集团飞机设计所，南昌 330024) (南昌航空大学 电子信息工程学院，南昌 330063)

摘 要：为实现两飞行器在飞行过程中的正常通信，需建立一套通信区域的计算模型.基于空地无线数据链通信，从其实现正常通信的条件出发，考虑通信链路中的发射机、接收机、收发天线、传输空间及地球曲率、飞行器姿态角以及飞行器的空间位置关系等因素，分析研究了飞行器间无线数据链通信区域，建立了两飞行器间无线数据链通信区域的数学模型，包括天线、飞行高度、两飞行器空间位置关系、通信区域模型等.该模型已成功应用于某型号，为分析建立在无线数据链通信方式基础上的空地无线传输系统通信区域提供了参考，也适用于飞船、卫星等其它空空、空地无线数据通信系统.

关 键 词：飞行器；数据链；通信区域；位置关系

中图分类号：V 217+.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)09-1117-04

Modeling of wireless datalink communication region between two aircraft

Yu Fuzhang Cai Zhiyong

(Aeroplane Design & Research Institute, Hongdo Aeronautical Industrial Group, Nanchang 330024, China)

Hu Yingqiong

(Dept. of Electronic Engineering, Nanchang Aeronautical University, Nanchang 330036, China)

Abstract: A mathematical model of communication region should be developed for realizing normal communication of two aircraft in flight. Based on the air-to-ground wireless datalink communication, the wireless datalink communication area between two aircraft was analyzed by considering the factors such as transmitters, receivers, send and receive antennas in communication datalink, transmission space and earth curvature, vehicle attitude angle and space positional relationship of aircrafts from implementing the normal communication conditions. A mathematical model of wireless datalink communication area between two aircraft was developed, including antennas, flight altitude, space positional relationship of two aircraft, communication area models and so on. The model has been successfully applied to a particular model; it provides a reference for analyzing air-to-ground wireless transmission system communication area based on the wireless datalink communication, and supplies for the spacecraft, satellite and other air-to-air, air-to-ground wireless data communications systems.

Key words: aircraft; datalink; communication region; positional relationship.

飞行器在空中要保持正常的通信，两个飞行器之间需要进行无线数据信息传输.实现空地无线数字正常通信的必要条件为：发射机发射功率经过空间传输后，到达接收机的接收端接收到的信号能量不小于接收机灵敏度要求.要保证空地无线数据链正常通信，就必须限制飞行器活动的范围.

通信区域主要指正常通信下飞行器甲相对于飞行器乙所允许的活动区域，是由飞行器甲、飞行器乙两飞行器间空间距离及相对角度共同决定的，主要影响因素有：发射机及其发射功率、接收机及其灵敏度、收/发天线类型、通信方式、选用频

收稿日期：2008-08-25

作者简介：余伏章(1974—)，男，江西南昌人，高级工程师，yfztiger650@163.com.

段、安装结构等，此外还跟环境噪声、天气状况等环境因素有关，也与飞行器的结构有关.

本文通过建立一套通信区域及飞行器姿态的分析模型，从理论上对该通信区域及飞行器姿态范围进行数学建模，文中提出的假设如下：

① 假设天线方向性图是理想平滑的；

② 假设地球是理想球形且表面是平滑的；

③ 为便于分析，对某些边界条件作理想化或简化处理，实际应用时作适当的修正即可.

1 基本参数与公式

在空地无线通信系统的研究中，首要任务就是建立稳定的无线通信链路，并研究飞行器甲与飞行器乙间的通信区域. 通信区域由通信距离和相对角度共同决定，飞行器甲的姿态航向发生了变化，通信区域就相应的发生变化；飞行器甲的作用距离和飞行高度也同样会影响通信区域的动态变化.

1.1 基本参数

本文中用到的飞行器参数有：飞行器甲当前位置(J_a，W_a，H_a)、飞行器甲当前航向角 α_a；飞行器乙位置(J_m，W_m，h_m)可以实时得到. 其中，J 为经度(东经为正，西经为负)，W 为纬度(北纬为正，南纬为负)，H 为高度.

1.2 无线数字通信链路公式

在空地无线通信系统的研究中，首要任务就是建立稳定的无线通信链路. 无线数字通信链路是指：上行或下行信息由发射机到接收机所经过的传输路径，包括发射机、高频接头、馈线发射天线、传输空间、接收天线、高频馈线及接收机等. 无线数字通信链路[1]计算公式为：

$$P_t = E_s/N_o + L_{sp} + r_s + L + M + K - G_t - G_r/T_n \tag{1}$$

其中，P_t 为发射机发射功率，dBW；E_s/N_o 为码元能量对噪声谱密度之比，dB，取 13 dB；L_{sp} 为空间损耗，dB；r_s 为码元速率，dBBand/s；L 为设备及其他损耗，dB；K 为波尔兹曼常数(−228.6 dBWs/K)；G_t 为发射天线增益，dB；M 为系统余量，dB；G_r 为接收天线增益，dB；T_n 为接收系统温度(28.6 dBK).

无线数字通信实现正常通信的条件为：

$$P_t + G_t + G_r/T_n - E_s/N_o - L_{sp} - r_s - L - M - K \geqslant 0 \tag{2}$$

空间损耗如下：$L_{sp} = 32.45 + 20\lg f_T + 20\lg D$ (dB)

其中，D 为飞行器甲与飞行器乙间直线距离，km，以下同；f 单位为 MHz.

1.3 天线类型及相关函数

天线是一种导行波与自由空间波之间的转换器件或换能器. 下面介绍一下相关公式：

1) 上行发射天线归一化方向性函数近似为

$$F_{Tt}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\beta l}{2}(1/k - \cos\theta)\right)\sin\left(\frac{\beta d}{2}\sin\theta\right)\cos\theta}{F_{max}\,\frac{\beta d}{2}\sin\theta(1/k - \cos\theta)} \tag{3}$$

其中，$\beta = 2\pi f_T/c$，f_T 为工作频率，Hz；c 为光速；l 为天线长度，m；d 为天线直径，m；k 为跟天线有关的常数；F_{max} 为归一化因子[2].

2) 下行接收天线归一化方向性函数近似为

$$F_{Zr}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\beta l}{2}(1/k - \cos\theta)\right)\sin\left(\frac{\beta d}{2}\sin\theta\right)\cos\theta}{F_{max}\,\frac{\beta d}{2}\sin\theta(1/k - \cos\theta)} \tag{4}$$

其中，$\beta = 2\pi f_Z/c$，f_Z 为工作频率，Hz.

1.4 飞行器攻角及空间位置参数

图 1 为整个系统通信时空间相对位置示意图. 其中，飞行器甲攻角指飞行时飞行器轴线与水平面间的夹角；地平线均指飞行器甲或飞行器乙所在地理位置的水平线.

下面分析计算各有关参数，取地球半径 $R = 6\,378$ km，根据实际分析及应用，取飞行器甲飞行攻角 $\theta_A = 0°$.

1) 收、发间距离[3] D 计算

设在地球坐标系中，飞行器甲当前位置坐标为(J_a，W_a，H_a)，飞行器乙当前位置坐标为(J_m，W_m，h_m)，则 D 可由下式给出：

$$D = [(R+H)^2 + (R+h)^2 - 2(R+H)(R+h)\cos\varphi]^{1/2} \tag{5}$$

其中 $\varphi = 2\arcsin\sqrt{\sin^2\left(\frac{J_a - J_m}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{W_a - W_m}{2}\right)}$

2) 收、发间球面角 ϕ_E 计算

$$\phi_E = \arccos\frac{(R+H)^2 + (R+h)^2 - D^2}{2(R+H)(R+h)} \tag{6}$$

3) 飞行器乙与飞行器甲收发间视距线与地平线夹角 φ_A、飞行器甲机轴与收发间视距线夹角 ω_A 及飞行器甲攻角 θ_A 从图 1 可得出：

$$\left.\begin{aligned}&\theta_A = 0°\\&\varphi_A = 90° - \arccos\frac{(R+H)^2 - (R+h)^2 + D^2}{2D(R+H)}\\&\omega_A = \varphi_A - \theta_A\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

1.5　飞行器甲最低飞行高度

由于地球表面弯曲的影响,当飞行器甲与飞行器乙之间的距离大于一定值,而飞行器甲飞行高度过低时,地球的遮挡将可能使通信系统无法正常通信.因此,当飞行器甲与飞行器乙之间的距离确定时它们的飞行高度将受到相应的限制.飞行器甲最低飞行高度 H 计算公式如下:

$$\left.\begin{aligned} &H \geqslant 0 (D < D_{\mathrm{t}}) \\ &H \geqslant \sqrt{R^2 + (D - D_{\mathrm{t}})^2} - R (D \geqslant D_{\mathrm{t}}) \\ &D_{\mathrm{t}} = \sqrt{(R+h)^2 - R^2} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

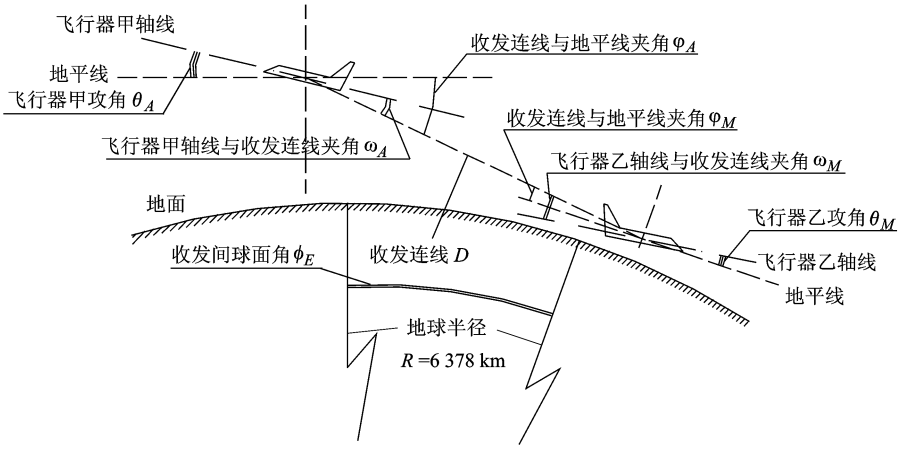

图 1　某系统空间相对位置示意图

2　数学模型建立及分析

2.1　数学模型建立

不妨以飞行器乙中心 O_{m} 为基准点、以前向水平轴线为 X_{m} 轴、正上方向为 Z_{m} 轴建立空间右手直角坐标系[4] $O_{\mathrm{m}}X_{\mathrm{m}}Y_{\mathrm{m}}Z_{\mathrm{m}}$.同时,以飞行器甲轴线相对于收发间视距线所在的垂直面的偏角为 0°、横滚角为 0°、俯仰角为 0°的飞行器甲中心 O_{a} 为坐标原点建立飞行器甲坐标系 $O_{\mathrm{a}}X_{\mathrm{a}}Y_{\mathrm{a}}Z_{\mathrm{a}}$,其中 $O_{\mathrm{a}}X_{\mathrm{a}}$ 轴保持水平.如图 2 所示.

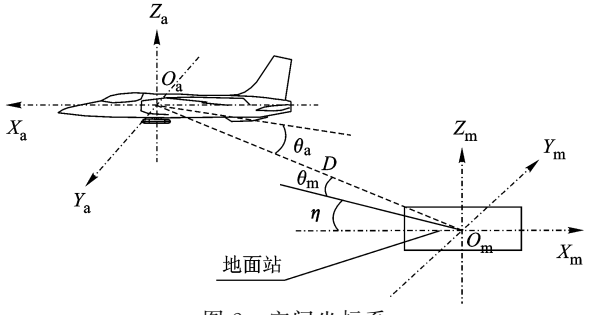

图 2　空间坐标系

取地球半径为 R,飞行器甲与飞行器乙间距离为 D,飞行器甲飞行高度为 H,飞行器乙飞行高度为 h,收发间视距线与飞行器乙天线电轴夹角为 θ_{m},收发间视距线与飞行器甲水平面(即飞行器甲坐标系的 OXY 平面)的夹角为 θ_{a},飞行器甲偏离飞行器乙水平轴线所在垂直面的水平角为 Φ_{am},飞行器乙下行接收天线电轴与其水平轴线夹角为 η,(°).

1) 计算 Φ_{am}

飞行器甲偏离飞行器乙水平轴线所在垂直面的水平角 Φ_{am} 可通过飞行器甲、飞行器乙在地球坐标系中的当前位置计算.不妨设在地球坐标系中,飞行器甲当前位置坐标为(J_{a},W_{a},H_{a}),飞行器乙当前位置坐标为(J_{m},W_{m},h_{m});上述参数均可从飞行器甲系统中获得.据此 Φ_{am} 可通过下式求得:

$$\Phi_{\mathrm{am}} = \zeta_{\mathrm{m}} - \alpha_{\mathrm{m}} \tag{9}$$

其中

$$\zeta_{\mathrm{m}} = \frac{J_{\mathrm{m}} - J_{\mathrm{a}}}{|J_{\mathrm{m}} - J_{\mathrm{a}}|} \arccos(\sin W_{\mathrm{a}} - \sin W_{\mathrm{m}} \cos(J_{\mathrm{a}} - J_{\mathrm{m}})) / [\sin^2 W_{\mathrm{a}} + \sin^2 W_{\mathrm{m}} + \sin^2(J_{\mathrm{a}} - J_{\mathrm{m}}) - 2\sin W_{\mathrm{a}} \sin W_{\mathrm{m}} \cos(J_{\mathrm{a}} - J_{\mathrm{m}})]^{1/2}$$

或　　$\zeta_{\mathrm{m}} = 0 \quad (J_{\mathrm{m}} = J_{\mathrm{a}})$

α_{m} 为飞行器乙航向角(即飞行器乙与当前位置地理北极的夹角).

2) θ_{m} 与 H_{a},h_{m},D,η 及 Φ_{am} 的关系

收发间视距线与飞行器乙水平轴线所在的水平面间夹角为

$$\omega_{\mathrm{m}} = \arccos \frac{(R+h)^2 + D^2 - (R+H_{\mathrm{a}})^2}{2D(R+h)} - 90^\circ + \theta_M \tag{10}$$

由此,经分析计算并化简可得出收发间视距线与飞行器乙水平轴线间夹角 θ_{m} 为

$$\theta_{\mathrm{m}} = \arccos(\cos \omega_{\mathrm{m}} \cos(\pi - \Phi_{\mathrm{am}}) \cos(\eta - \theta_M) + \sin \omega_{\mathrm{m}} \sin(\eta - \theta_M)) \tag{11}$$

3) θ_a,θ_m与D间的关系

根据式(2),传输系统实现通信的条件为:

$$10\log F_t(\theta_t)+10\log F_r(\theta_r)-20\log D\geqslant A \tag{12}$$

其中,$A=-P_t-G_{t0}-G_{r0}/T_n+E_s/N_o+L_{sp0}+r_s+L+M+K$ 为常数,dB;$F_t(\theta_a)$,$F_r(\theta_m)$分别为上行或下行收/发天线的归一化方向性函数;G_{t0},G_{r0}分别为发射天线、接收天线最大增益;L_{sp0}为自由空间损耗的常数部分.

2.2 通信区域分析

上行/下行通信区域主要指正常通信下飞行器甲相对于飞行器乙所允许的活动区域,由通信距离及飞行器甲相对于飞行器乙水平轴线的角度确定.对某一确定的距离,均存在一定的角度范围(偏离飞行器乙天线电轴),在该范围内在某些特定条件下可实现正常通信.

通信区域边界通过通信天线方向性函数及通信数据链路公式可确定为:

$$10\log F_t(\theta_t)F_r(\theta_r)-20\log D\geqslant A$$

即

$$F_t(\theta_t)F_r(\theta_r)\geqslant D^2\times 10^{A/10} \tag{13}$$

鉴于通信区域是以飞行器乙为参考中心,因此可认为飞行器甲上行接收天线及下行发射天线均以最理想的状态对准飞行器乙,即它们的增益取最大值、收发间视距线与它们的电轴重合,其归一化方向性函数均为1;设飞行器乙天线(上行发射上行及下行接收天线)的归一化方向性函数均为$F(\theta_m)$,则上式可化为:

$$F(\theta_m)\geqslant D^2\times 10^{A/10} \tag{14}$$

其中$F_t(\theta_a)$,$F_r(\theta_m)$分别为上行或下行收/发天线的归一化方向性函数,由式(3)或式(4)确定;θ_m由式(11)确定.

根据式(8)、式(14),将飞行器乙天线参数、位置参数(J_m,W_m,h_m),η,A等已知参数代入,即可分别确定武器系统上行通信和下行通信的D和当前飞行器甲的位置参数(J_a,W_a,H_a)间的关系,它们共同决定飞行器甲的活动范围,即通信区域.取上行和下行系统通信区域的交集即为空地无线通信系统的通信区域.

3 结束语

本文对某航空通信系统中两飞行器间无线数据链通信区域进行了分析研究.建立了可通信区域范围的分析模型,对该系统通信区域范围分析计算.为建立在无线数据链通信体制基础上的空地传输系统通信范围的分析及应用提供了分析解算原理,确保在飞行过程中两飞行器时刻保持正常的通信.该模型既适用于航空飞行器,也适用于飞船、卫星等其它空空、空地无线数据通信系统.

参考文献(References)

[1] 李雪,徐勇,王策,等.利用月面链路的月球车定位体制[J].北京航空航天大学学报,2008,34(2):183-187
Li Xue, Xu Yong, Wang Ce, et al. Position of rover by UHF communication link onLunar surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(2):183-187(in Chinese)

[2] 罗一锋,李含辉,黄继进.超短波通信链路分析[J].现代电子技术,2006,224(9):41-45
Luo Yifeng, Li Hanhui, Huang Jijin. An approach to ultra-short wave link[J]. Modern Electronics Technique, 2006, 224(9):41-45(in Chinese)

[3] 郑涛.无人机系统的仿真建模研究[D].西安:西北工业大学航空学院,2001
Zheng Tao. Research on simulation and modeling for unmanned aerial vehicle system[D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2001(in Chinese)

[4] 桂延宁,张福顺,焦李成.飞行器轨迹及参数测量的一种新方法[J].电子学报,2003,31(12):1894-1896
Gui Yanning, Zhang Fushun, Jiao Licheng. A new method of trace and parameter measurements for flying objects[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12):1894-1896(in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)