

## 多飞机着陆测距信号的功率控制策略

汪筱阳, 吴德伟, 戴传金

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

**摘要** 在飞机着陆系统中,进行询问回答式测距时,每一个飞机的询问信号都可能会成为其他飞机的干扰。在有限的可用功率下,就需要一个可靠和高效的功率控制策略。主要分是否发送功率控制指令两类进行研究,在无通信功率控制方法时,推导了飞机的发射功率方程,分析了此方法的不足。在需要发送功率控制指令的情况下,着重分析了固定步长和基于纳什博弈论的功率控制。并对以上讨论的功率控制方法都进行了仿真分析,并对比说明了优缺点。基于纳什博弈策略的功率控制算法收敛快,且发射功率较固定步长迭代处于一个较低的水平上,说明基于纳什博弈策略的算法减小了发射功率,节约了能耗。能够满足像飞机这样高动态运行体的需求。对功率控制策略选择提供参考。

**关键词** 功率控制;码相关测距;纳什博弈论;牛顿迭代

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.017

**中图分类号** TN966;TP391.9 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0075-05

## Research of Power Control Strategy of Range Signal on Airplanes Landing

WANG Xiao-yang, WU De-wei, DAI Chuan-jin

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In a landing system, each airplane's asking signal contributes to the interference seen by the other airplanes when it is ranging through asking-replying. In a given condition of limited available power, a reliable and effective power control strategy is needed. According to whether the ground station transmits instructions of power control, this research is made up of two parts. With no communication power control method, the equation of transmitting power is deduced and the shortage of the method is analyzed. The research places emphasis on the analysis of power control of fixed step and based on Nash game in the situation that the ground station needs to transmit instructions. Every method above has been simulated and the advantages and disadvantages are expatiated respectively through comparison. The method based on Nash game has a faster constringency and transmitting power stays at a lower level than fixed step, which means that the use of the method based on Nash game reduces the transmitting power and saves energy. So the method can meet the demands of high dynamic body like airplane. This scheme may provide a reference for the choice of power control strategy.

**Key words:** power control; ranging using code correlation; Nash game; Newton iterations

飞机在进行着陆时,通过询问回答式测距,就需要向地面台站发射测距询问信号。但是对于多架飞

收稿日期:2012-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61104056)

作者简介:汪筱阳(1987-),男,四川成都人,硕士生,主要从事无线电导航研究. E-mail: wangxiaoyang1987@163.com

机同时进行着陆而言,信道码的互相关作用将产生两方面的影响:一是任何一个信道将受到其它不同码信道的干扰,即多址干扰;二是距离接收机近的信道将严重干扰距离接收机远的信道的接收,使近端强信号掩盖了远端弱信号,即远近效应<sup>[1-2]</sup>。

为了克服上述多址干扰和远近效应的问题,就必须对飞机的发射功率进行控制。功率控制是指接收端和发射端的发射功率根据需要时刻变化,使系统既能维持高质量的通信,又能避免对同频道的其他码分信道产生干扰。通过功率控制使每架飞机的测距询问信号到达地面台站的信干比(SIR)满足要求,从而能够解调出信号,对飞机实施测距。

## 1 无通信功率控制方法

自由空间损耗:当发射机和接收机之间的媒质/环境没有障碍物,而只有一条简单的视距路径时,自由空间传播模型可以用于预测接收信号的功率。典型路径损耗模型预测的接收功率随着发射机和接收机之间距离的增加而呈幂指数衰减。自由空间的路径损耗模型定义为<sup>[3]131-133</sup>:

$$P_{Rx} = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \left[ \frac{c}{4\pi d f} \right]^2 \quad (1)$$

式中: $P_{Rx}$ 为预测的接收功率; $P_{Tx}$ 为发送功率; $G_{Tx}$ 为发送天线增益; $G_{Rx}$ 为接收天线增益; $\lambda$ 为载波波长; $d$ 为飞机与地面接收机之间的距离。

当有若干架飞机进近时,地面接收机通道1接收到第1架飞机信号的同时也会接收到其它飞机的询问信号,由于每架飞机的询问码存在互相关,那么在通道1处其它飞机的信号对飞机1而言就相当于干扰。假设在各通道处只要信号功率大于干扰功率接收机就能解调出信号,即使每架飞机在各通道的SIR不小于0 dB。因为飞机与地面接收机的距离是已知的,当有固定 $n$ 架飞机进近,由分析知,只要各个飞机在进近距离上按预先设定好的功率发射,此发射的功率能够满足所有进近的飞机的发射功率到达地面接收机通道时的SIR满足要求,就等同于进行了功率控制。

$P_{Ri}$ 为地面接收机接收到的第 $i$ 架飞机的功率,那么第 $i$ 架飞机的询问信号到达地面台站时的SIR为:

$$\gamma_i = \frac{P_{Ri}}{\sum_{j \neq i} P_{Rj} c_{ij} + \eta_i} \quad (2)$$

式中: $c_{ij}$ 表示码相关系数且 $c_{ij} = (s_j^T s_i)^2$ ;  $s_i$ 表示飞

机 $i$ 的测距伪随机码<sup>[4]</sup>;  $\eta_i$ 表示飞机带宽内的接收机背景噪声功率。

为求得飞机预先设定好的发射功率,假设发送天线增益 $G_{Tx} = 10^5 = 50$  dB,接收天线增益 $G_{Rx} = 10^6 = 60$  dB,  $f = 5.03 \times 10^9 = 5.03$  GHz,由式(2)得 $P_{Ri} \approx \frac{AP_{Ti}}{d_i^2}$ ,其中 $A = 2.25$ ,  $d$ 的单位为km。要使 $n$ 架飞机到达地面接收机的功率不小于噪声功率,那么有:

$$\begin{bmatrix} 1 & -c_{12} & \cdots & -c_{1n} \\ -c_{21} & 1 & \cdots & -c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{n1} & -c_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{AP_{T1}}{d_1^2} \\ \frac{AP_{T2}}{d_2^2} \\ \vdots \\ \frac{AP_{Tn}}{d_n^2} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

当每架飞机与地面接收机的距离已测得时( $d$ 已知),且当上式取等时,即飞机到达地面接收机的功率与噪声功率相等时(SIR=0 dB)。由上式可计算出每架飞机在进近距离上的发射功率 $P_{Ti}$ ,且与距离 $d$ 的二次方呈线性关系。此时飞机只需要在固定的距离上发送固定的功率,就可以满足这 $n$ 架飞机发射功率到达地面接收机的SIR满足要求。图1为3架飞机分别从40 km、20 km、8 km处开始进近时,各个飞机发射功率与进近距离的关系。

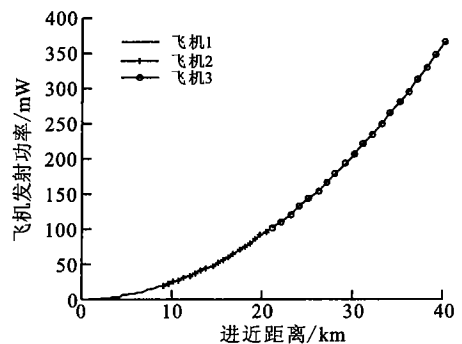


图1 3架飞机进近时发射功率与进近距离的关系

Fig. 1 The relation of transmitting power and approach distance when three airplanes approaching

由以上分析可知,此种功率控制方式虽然简便易行,但是飞机自身不知道有多少架飞机进近,若增加或减少若干架飞机,上述方程的解就会随之而改变,即每架飞机的发射功率都会随之而改变,且功率控制误差很大。也就是说若干架飞机其实构成了一个系统,任意的减少或者增加飞机的数量都会打破这个系统的平衡,使每架飞机的SIR不再满足设定的要求。

## 2 固定步长的功率控制

研究单比特固定步长功率控制 (DM) 算法,即通过接收端测量接收到的信噪比,与门限值相比较,产生并发送功率控制命令,发射端根据接收到的控制命令,按照固定步长调整发射功率<sup>[5]</sup>。其中门限值根据接收端能解调出信号的最小可检测门限设定,这里设为 0 dB。

$\gamma_i^{sr}$  为飞机  $i$  的目标 SIR,当  $\gamma_i < \gamma_i^{sr}$  时,  $P_{Ti} = P_{Ti} + \text{step}$ ,否则  $P_{Ti} = P_{Ti} - \text{step}$ 。式(3)改写为:

$$A \begin{bmatrix} \frac{1}{d_1^2} & -\frac{c_{12}}{d_2^2} & \dots & -\frac{c_{1n}}{d_n^2} \\ -\frac{c_{21}}{d_1^2} & \frac{1}{d_2^2} & \dots & -\frac{c_{2n}}{d_n^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{c_{n1}}{d_1^2} & -\frac{c_{n2}}{d_2^2} & \dots & \frac{1}{d_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{T1} \\ P_{T2} \\ \vdots \\ P_{Tn} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

第  $i$  个飞机受到的干扰表示为  $I_i(P_{T-i})$ ,其中下标  $-i$  表示这个干扰是依赖于除第  $i$  个飞机之外的其它所有飞机的发射功率,定义为  $I_i(P_{T-i}) = \sum_{j \neq i} g_{ij} P_{Tj} + \eta_i$ 。假设环增益相对于 SIR 变化很慢。那么第  $i$  个飞机发射功率到达地面接收机时的 SIR 为:

$$\gamma_i = \frac{g_{ii} P_{Ti}}{I_i(P_{T-i})} = \frac{g_{ii} P_{Ti}}{\sum_{j \neq i} g_{ij} P_{Tj} + \eta_i} \quad (5)$$

为了验证固定步长的收敛速度,这里假设增益矩阵已知。模拟仿真更新方程式(5)。对于含有 3 个飞机的系统,设增益矩阵:  $G = \begin{bmatrix} 0.910 & 0 & 0.088 & 2 & 0.035 & 7 \\ 0.152 & 4 & 0.950 & 0 & 0.250 & 1 \\ 0.067 & 0 & 0.024 & 4 & 0.930 & 0 \end{bmatrix}$ ,所有的初始功率值都为 0.1,目标 SIR 均设为 5 dB,固定步长  $\text{step} = 0.5$  dB。仿真结果见图 2、3。

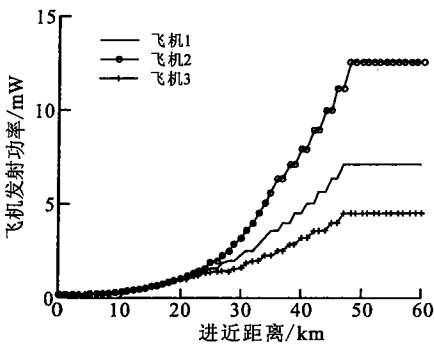


图 2 飞机发射功率与迭代次数的关系  
Fig. 2 The relation of transmitting power and iteration times

此种功率控制方式较简单,但存在以下问题:①

功率变化步长很难确定,选得过大,使收敛时的波动较大,发射机响应跟不上,选得太小,收敛时间太慢,功率控制误差增大,步长的取值存在着控制精度与响应速度的矛盾<sup>[6]165-202</sup>;②算法本身收敛较慢,功率控制误差大。

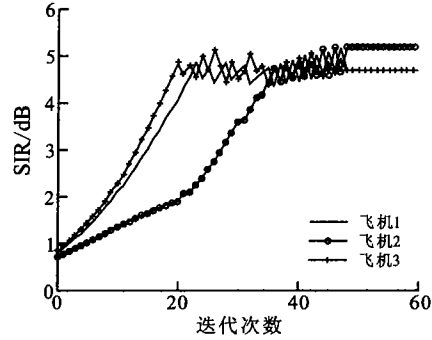


图 3 飞机 SIR 与迭代次数的关系  
Fig. 3 The relation of SIR iteration times

## 3 基于纳什博弈策略的功率控制

文献[7]介绍了基于纳什博弈论的功率控制策略,这里将它应用于飞机的功率控制进行研究。其中定义代价函数为:

$$J_i(p_i, \gamma_i) = b_i p_i + c_i (\gamma_i^{sr} - \gamma_i)^2 \quad (6)$$

式中  $b_i$  和  $c_i$  是恒定的权重因数。在以下分析中我们可以看到,只需要功率权重  $b_i$  与 SIR 的权重  $c_i$  之比。对于不同的应用,选择不同的  $b_i/c_i$ 。在强调功率时选择  $b_i/c_i > 1$ ,在强调 SIR 时选择  $b_i/c_i < 1$ 。

经推导,功率更新方程如下:

$$p_i^{(k+1)} = \frac{\gamma_i^{sr}}{g_{ii}} I_i^{(k)} - \frac{b_i}{2c_i} \left( \frac{I_i^{(k)}}{g_{ii}} \right)^2 = f_i(p_i^{(k)}) \quad (7)$$

这里  $p_i^{(k+1)}$  是第  $k+1$  步时第  $i$  个飞机的发射功率,  $I_i^{(k)}$  是在运算第  $k$  步时第  $i$  个飞机的测量噪声,为  $I_i^{(k)} = \sum_{j \neq i} g_{ij} p_j^{(k)} + \eta_i$ 。

模拟仿真更新方程(7)。对于含有 3 个飞机的系统,参数同上。仿真结果见图 4、5。

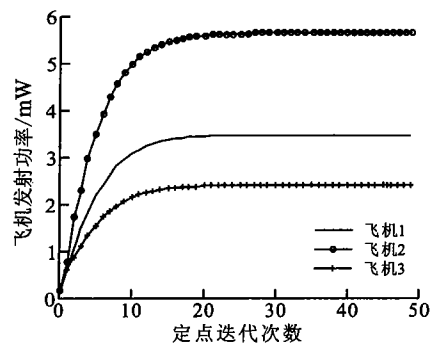


图 4 飞机发射功率与定点迭代次数的关系  
Fig. 4 The relation of transmitting power and fix-point iteration times

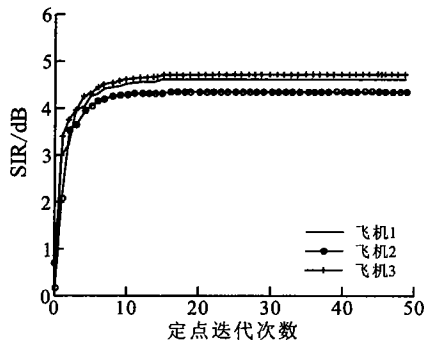


图5 飞机 SIR 与定点迭代次数的关系

Fig. 5 The relation of SIR and fix-point iteration times

图4、5与图2、3比较可以看出,定点迭代方式较固定步长方式在迭代次数上有所减少,迭代速度快,且在收敛时也较平稳,发射机的响应能够跟上。

承上所述,用一个线性估计来替代式(7)的二次方关系来获得牛顿迭代算法<sup>[8-9]</sup>。定义:  $\Delta I_i = I_i^{(k+1)} - I_i^{(k)}$ ,那么有:

$$(I_i^{(k+1)})^2 \approx 2I_i^{(k+1)} I_i^{(k)} - (I_i^{(k)})^2 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得到:

$$p_i^{(k+1)} \approx \left( \frac{\gamma_i^{\text{tar}}}{g_{ii}} - \frac{b_i}{2c_i g_{ii}^2} I_i^{(k)} \right) I_i^{(k+1)} + \frac{b_i}{2c_i g_{ii}^2} (I_i^{(k)})^2 \quad (9)$$

功率更新方程变为:

$$p_i^{(k+1)} - \alpha_i^{(k)} \sum_{j \neq i} g_{ij} p_j^{(k+1)} = \beta_i^{(k)} + \alpha_i^{(k)} \eta_i \quad (10)$$

其中定义变量:

$$\alpha_i^{(k)} = \frac{1}{g_{ii}} \left( \gamma_i^{\text{tar}} - \frac{b_i}{c_i g_{ii}} I_i^{(k)} \right) \quad (11)$$

$$\beta_i^{(k)} = \frac{b_i}{2c_i g_{ii}^2} (I_i^{(k)})^2 \quad (12)$$

式(10)可写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & -\alpha_1^{(k)} g_{12} & \cdots & -\alpha_1^{(k)} g_{1N} \\ -\alpha_2^{(k)} g_{21} & 1 & \cdots & -\alpha_2^{(k)} g_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_N^{(k)} g_{N1} & -\alpha_N^{(k)} g_{N2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^{(k+1)} \\ p_2^{(k+1)} \\ \vdots \\ p_N^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1^{(k)} + \alpha_1^{(k)} \eta_1 \\ \beta_2^{(k)} + \alpha_2^{(k)} \eta_2 \\ \vdots \\ \beta_N^{(k)} + \alpha_N^{(k)} \eta_N \end{bmatrix} \quad (13)$$

模拟仿真更新方程(13)。仿真结果见图6、7。

图6、7与图4、5比较可以看出,牛顿迭代较定点迭代方式,收敛速度大大提高,更能够满足飞机这样高速运行体的需求。

基于纳什博弈策略的功率控制方法较常规的功率控制方法在实时性和能耗方面都有提高,不论是定点迭代还是牛顿迭代方法都能在收敛上比较平稳,且牛顿迭代在收敛速度上大大提高,完全能够满足无人机高动态的要求,且从飞机的发射功率图上

可以看出,纳什博弈策略的功率控制在最终功率稳定时处于一个较低的水平,也就是说在满足所有飞机的测距信号能够在地面接收处解调的情况下,在此策略中,可以节约每一架无人机的发射能耗。

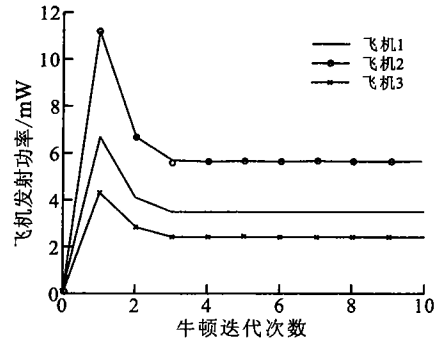


图6 飞机发射功率与牛顿迭代次数的关系

Fig. 6 The relation of transmitting power and Newton iteration times

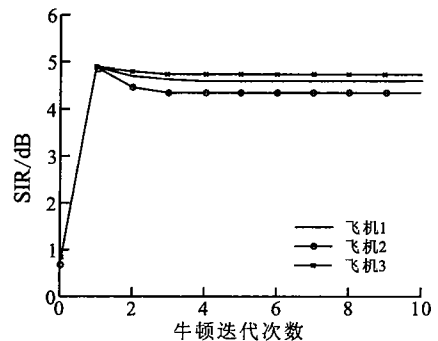


图7 飞机 SIR 与迭代牛顿次数的关系

Fig. 7 The relation of SIR and Newton iteration times

## 4 结论

1)当地面接收机不发送功率控制指令时,实现功率控制需要测得每架飞机与地面接收机的距离,且此时只能是固定的飞机架次,若增加或减少一架飞机都会改变每架飞机的发射功率,所以采用此方法时,一般选择满容量时,即能同时回答最多架次飞机的情况,这样若飞机架数减少就不会降低飞机到达地面接收机的 SIR。

2)当地面接收机发送功率控制指令时,实现功率控制可以不需要知道飞机与地面接收机的距离,因为地面接收机只需要测出飞机到达接收机的功率,若接收功率大了就发送指令告知飞机减小发送功率,反之亦然。直至所有飞机的 SIR 满足要求为止。但是此时需要增加飞机与地面接收机通信部分使得电路更加复杂;且存在数据更新率的问题,需要一个收敛很快的算法来实现。

3)在需要发送功率控制指令时,讨论了固定步长与定点迭代和牛顿迭代方法,固定步长电路较简

单、方便,但收敛慢,且稳定后存在波动,由于发射机存在响应时间,实际实现有一点困难;定点迭代和牛顿迭代较固定步长发射功率变化平稳,发射机实现较容易,且收敛较快;牛顿迭代较定点迭代收敛更快。

#### 参考文献(References):

- [1] 庞宝茂. 移动通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2009.  
PANG Baomao. Mobile Communication[M]. Xi'an: Xidian university press,2009. (in Chinese)
- [2] 朱明. 功率控制在CDMA以及实际接收机中的应用[J]. 中山大学研究生学刊:自然科学、医学版,2007,28(1):45-50.  
ZHU Ming. Power control in CDMA and the application in the receiver[J]. Journal of the graduates Sun Yat-Sen university:natural sciences. medicine,2007,28(1):45-50. (in Chinese)
- [3] 博布兹. 通信信号处理[M]. 刘祖军,田斌,易克初,译. 北京:电子工业出版社,2010.  
Joseph Boccuzzi. Signal processing for wireless communications[M]. LIU Zujun, TIAN Bin, YI Kechu, translated. Beijing:Publishing house of electronics industry. (in Chinese)
- [4] 辜方林,张杭. CDMA系统中的一种分布式功率控制算法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(19):118-120.  
GU Fanglin, ZHANG Hang. Distributed power control algorithm in CDMA systems[J]. Computer engineering and applications,2011,47(19):118-120. (in Chinese)
- [5] Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems[J]. IEEE trans on vehicular technology,1992,41(1):57-62.
- [6] 彭木根,王文博. 无线资源管理与3G网络规划优化[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.  
PENG Mugen, WANG Wenbo. Wireless resource manage and 3G network program optimize[M]. Beijing:The people post and telecommunications press,2008. (in Chinese)
- [7] Zoran Gajic ,Sarah Koskie. Newton iteration acceleration of the Nash game algorithm for power control in 3G wireless CDMA networks [J]. Proceedings of SPIE,2003,5244:115-221.
- [8] Ortega J M,Rheinboldt W C. Iterative solution of non-linear equations in several variables, academic press [M]. New York:Academic press,1970.
- [9] Burden R L,Faires J D,Reynolds A C. Numerical analysis[M]. Boston:Prindle, weber & schmidt, 1981.

#### 本刊相关链接文献:

- [1]吴松,吴德伟,王伟. 无人机微波起降系统坐标变换算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(1):68-72.
- [2]苗强,吴德伟,解蕾. 微波着陆系统模型试验环境模型的实现[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(6):60-64.
- [3]吴德伟,郇能建,戚君宜. 基于认知理论的UCAV智能导航研究新进展[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(4):52-57.
- [4]段磊,吴德伟,何晶,蒋文亭. 某型微波着陆设备移相器故障诊断方法研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(3):50-55
- [5]吴德伟,伍维甲,张斌. 微波着陆系统波束指向误差仿真分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2008,9(4):64-68.

(编辑:徐楠楠)