

毫米波/红外复合制导自动策略 生成算法研究*

黎 湘 傅耀文 庄钊文 刘郁林

(国防科技大学电子工程学院精确制导 ATR 国防重点实验室, 湖南, 长沙, 410073)

摘要 分析了环境和气候等因素对毫米波雷达和红外传感器性能的影响, 获得了两类传感器的环境及气候模型。在此基础上, 提出了一种基于各传感器性能模型的红外/毫米波复合自动策略生成算法。在自动生成复合策略的同时估计出复合后的性能, 以供复合制导中对传感器的控制使用。该方法的仿真实验结果与预先的分析结果较好地相符。

关键词 传感器, 复合, 自动策略生成

引言

多模复合制导即采用具有互补性能的两种或两种以上传感器, 在不同制导段由各传感器的性能特点决定各传感器是否工作, 以实现精确打击的目的。毫米波雷达距离分辨率高、波束宽并具有良好穿透性能, 适于大范围搜索、截获目标, 同时, 毫米波雷达还能从目标反射回波中提取到频谱、幅度、相位、极化等多种供目标识别用的信息, 弥补了红外传感器在这些方面的不足。而红外传感器的角分辨率高、制导盲区小, 可以克服毫米波雷达近距离闪烁漂移大的缺点。从目标隐身角度来看, 对红外隐身要求目标的反射性能好而对毫米波隐身要求目标的反射性能差, 目前还没有一种材料能同时对毫米波和红外有效地隐身。因此, 毫米波/红外复合制导正成为目前多模复合制导的研究重点。

在导引头运动过程中, 为了充分利用各传感器资源使系统性能达到优化, 就需要根据各传感器不同制导段的性能特点来有效控制和管理这些传感器, 即自动生成复合策略。例如, 在弹体运行过程中, 随着弹目距离不断变化, 毫米波雷达和红外传感器的性能相差很大, 故复合策略将表现为在某些距离段上只有其中一种传感器有效, 在某些距离段上两种传感器同时有效, 而且在不同的距离段上, 对两种传感器的复合加权也不相同。这将直接影响后续的复合性能。同理, 环境等因素也将同样对复合策略产生影响。总得来说, 复合策略生成应该是一个超平面性能图的有效组合问题。本文着重研究红外传感器和毫米波雷达在不同环境及气候下的性能模型, 依据这些性能模型研究供复合控制使用的管理策略生成算法, 文章最后给出了实验结果。

* 国家自然科学基金(编号: 69402006)和国防预研基金(编号: 95J6A. 6. 3)资助项目
稿件收到日期 1997-12-22, 修改稿收到日期 1998-05-04

1 红外传感器和毫米波雷达的环境和气候性能的建模

本文自动策略生成算法中采用了因素性能模型库技术,先建立各因素不同传感器的性能模型,集合后称之为性能模型库。在实际应用时实时通过算法来提取符合环境和气候情况的性能曲线以获得传感器自动管理的策略。因此,建立合理的传感器环境及气候性能模型至关重要。在不同的天气,不同的环境以及不同的弹目距离等条件下,毫米波和红外传感器的性能差别很大,用数学方法来建立性能模型是比较复杂的。本文以主动毫米波/红外反地面目标复合制导为研究背景,主要考虑:天气(晴天、雨天、雾)、温度、环境(沙地、树林、草地等)、距离4种因素。传感器性能有很多衡量标准(检测概率、虚警概率、识别概率等),本文采用恒虚警下的目标检测概率作为传感器的性能标准。下面分别讨论毫米波雷达和红外传感器性能的数学模型。

1.1 毫米波传感器性能模型

毫米波子源采用阶梯变频体制的雷达。雷达的检测概率 P_d 由雷达接收机终端的信噪比和信杂比决定。下面以对地面金属目标为例分析各种因素对雷达信噪比和信杂比的影响:

(1) 信噪比计算^[1]

输入端信噪比的计算为:

$$SNR_i = \frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma_T}{(4\pi)^3 R^4 K T_0 B F L_{RF}} 10^{-\alpha 20R}, \quad (1)$$

式(1)中 P_i 为发射功率, G 为天线增益, λ 为工作波长, σ_T 为目标的雷达截面积, R 为弹目标距离, K 为波尔兹曼常数, T_0 为环境温度, B 为带宽, F 为系统噪声系数, L_{RF} 为射频插入损耗, α 为传播衰减。

对信号适当处理的结果,终端信噪比可得到改善,具体的计算为

$$SNR = SNR_i \frac{SNR_i}{SNR_i + 2} n L_p^{-1}, \quad n = B \tau_p P_{RF} T_i, \quad (2)$$

式(2)中 L_p 为信号处理损耗, τ_p 为脉冲宽度, P_{RF} 为脉冲重复频率, T_i 为积分时间。

(2) 信杂比计算^[1]

输入端信杂比为

$$SCR_i = \sigma_T / \sigma_c, \quad (3)$$

式(3)中 σ_T 为目标的雷达截面积, σ_c 为波束照射的杂波面积。

$$\sigma_c = R \theta \frac{C \tau_p}{2} \sigma_0 S_{ec} \theta_{ep}, \quad (4)$$

式(4)中 θ 为半功率点波束宽度, τ_p 为脉冲宽度, σ_0 为地面雷达单位截面积, θ_{ep} 为俯视角。雷达终端信杂比为

$$SCR = SCR_i \frac{SCR_i}{SCR_i + 2} n L_p^{-1}, \quad (5)$$

由上面信噪比 SNR 计算可以看出它近似与弹目距离 R 的 4 次方成反比。但是, 当弹目距离 $R < 300\text{m}$ 左右时, 由于在目标上具有多个强散射源分布, 使得雷达接收的回波功率方向偏离了雷达与目标中心联线的方向即产生角闪烁, 从而使毫米波雷达性能下降。

烟雾对 100GHz 以下的毫米波影响较小, 可以忽略。毫米波在雨区中的后向散射对雷达等系统是一种不可忽视的杂波干扰。对雨杂波度量的一个基本量便是降雨雷达反射率 η 。考虑雨介质多重散射时, $\eta(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$ 与降雨率 $R_a(\text{mm}/\text{h})$ 呈幂指数关系:

$$\eta = \alpha R_a^b \quad (6)$$

各种地物杂波对毫米波雷达性能的影响可以通过计算地物杂波的单位截面积来描述。1978 年乔治亚工学院用当时获得的数据以半经验的方法建立了一种地物杂波模型:

$$\sigma_0(\text{db}) = -C_1 + C_2 \log_{10}(\theta/\theta_0) - C_3 \log_{10}(\lambda/\lambda_0), \quad (7)$$

式(7)中 σ_0 为雷达单位截面积, θ 为仰角, λ 为发射波长。

1987 年 Currie 等人又提出一种新的杂波修正模型:

$$\sigma_0 = A (\theta + C)^B, \quad (8)$$

并给出了 35GHz 和 95GHz 时 4 种典型地物杂波模型常数(见表 1)。

表 1 35GHz 和 95GHz 时 4 种典型地物杂波模型常数

Table 1 The model parameters of 4 typical ground clutters at 35GHz and 95GHz

杂波类型	频率 f/GHz	A	B	C
湿雪	35	0.23	1.5	0.033
	95	0.58	1.5	0.037
干雪	35	2.30	1.5	0.035
	95	3.00	1.5	0.037
树	35	0.047	0.5	0.031
	95	0.34	1.5	0.035
草/农作物	35	0.30	2.0	0.036
	95	0.20	1.0	0.036

综合以上性能模型可得出毫米波传感器的性能曲线, 在本算法中, 采取弹目距离连续变化, 气候和环境离散建模的方法, 具体说, 就是模型库中分别存储不同环境和气候下的随距离变化的毫米波雷达性能曲线, 由先验知识实时提取合乎战场环境和气候的性能模型曲线供后续的复合策略生成算法使用。

1.2 红外传感器性能模型

针对红外成像传感器, 首先考虑弹目距离对红外传感器的影响。设导弹发射时弹目距离 R 为导弹最大射程, 设为 2000m , 导引头光学系统的焦距约为 100mm , 成像器件的像元尺寸为 $50 \times 50\mu\text{m}$ 或 $60 \times 60\mu\text{m}$, 沟渠尺寸为 $12 \sim 20\mu\text{m}$, 像元数为 64×64 , 则计算和实验表明: 此时目标在导引头成像器件上只占 3×3 或 4×4 像元, 达不到成像标准。当 $R = 1000\text{m}$ 时, 目标像元数为 8×8 , 刚达到成像标准。当 $R = 500\text{m}$ 时, 为 16×16 。当 $R = 250\text{m}$ 时, 为 32×32 。当 $R = 125\text{m}$ 时, 为 64×64 。此时目标图像已充满成像器件, 传感器不能跟踪整个目标图像, 但可跟

踪目标上的一部分,直到目标的任何特征都不能被分辨,因此我们可以认为,红外传感器的性能先随弹目距离 R 增强,当 R 小于某一距离后,开始逐渐下降

在烟雾条件下,目标红外辐射的大气透过率降低,使红外传感器的性能下降,大气透过率可以表示为^[2]

$$\tau(R) = \exp(-\delta \times R), \quad (9)$$

式(9)中 δ 为衰减系数, R 为弹目距离,在大多数情况下,衰减系数 $\delta = \alpha + \gamma$,式中 α 为吸收系数,起源于气体分子的吸收; γ 为散射系数,起源于云雾的散射

红外传感器是通过目标与背景之间的温差来探测目标,相对于背景温度 ΔT 的目标产生的信噪比等于:

$$SNR = \frac{\Delta T}{NEDT} \tau(R), \quad (10)$$

式(10)中 $NEDT$ 为噪声等效温差, $\tau(R)$ 为大气透过率

温度对吸收系数 α 有很大影响,如湿热环境条件下,水分子的吸收占主导地位, α 主要由水分子吸收决定,表2为饱和湿度条件下8~11 μm 波段水分子吸收系数 α 同气温的关系:

表2 8~11 μm 波段水分子吸收系数 α 同气温的关系
Table 2 The relation between absorption coefficient of water molecule at 8~11 μm waveband and temperature

$t/^\circ\text{C}$	19	20	25	30	35	40
α	0.234	0.238	0.313	0.41	0.545	0.781

与毫米波雷达性能模型一样,先验模型库中各子源传感器在各种环境及气候因素下的 R 性能曲线是通过估计该环境及气候因素下若干个距离点处的性能,然后采用最小二乘法进行拟合,为了使传感器性能曲线与实际使用的毫米波、红外传感器性能更好地相符,先验模型库中的传感器性能曲线可以很方便地由专家通过修改参考点处的性能而加以修正

2 复合策略生成算法

多传感器信息融合实际上是对有脑综合处理复杂问题的一个较高层次上的模拟,是一种仿人的自动智能决策过程,研究表明,人脑中的神经元之间通过突触相连接,进入突触的信号作为输入,它们通过突触而被加权,所有加权输入的总效果是它们的总和,如果和值等于或大于该神经元的门限,该神经元被激活即给出输出信号,否则不被激活

受人脑综合处理信息的启发,我们把毫米波和红外两个子源看成是两个与融合中心相连的神经元,由各种因素决定的性能分别是各自总的输入,当传感器的性能等于或大于某个门限时,就激活该子源,即该子源有效,否则认为该子源处于盲区

具体的复合策略生成过程如下:

(1) 由前面对毫米波和红外传感器信噪比、信杂比的分析,估计出各种环境及气候因素下各传感器在若干个距离点处的性能,然后用最小二乘法拟合得到性能曲线,建立模型库

(2) 由现场给出的环境及气候因素激励先验模型库中相应的性能曲线

(3) 在弹体飞行过程中, 根据毫米波和红外子源实时给出的弹目距离 R 和激活的性能曲线可以得到各子源的性能, 然后与预先给定的各子源性能门限相比较。若大于给定的性能门限, 则该子源有效。否则该子源无效, 不参与复合。

(4) 由激活子源的性能, 根据复合性能模型, 估算出复合后的性能。当毫米波和红外两者只有一个有效时, 复合性能即为该单源的性能。下面分析两者都有效时的复合性能。

复合性能 PM 应该是各子源性能的函数: $PM = F(pm_1, pm_2)$, 就信息融合的起源来说, 它是模仿人脑对从外界收到的各种信息加工整合的过程。该过程可分为注意过程和自组织过程。注意过程主要完成对收到的信息按其重要和可靠程度排序, 越是重要的信息对神经中枢的刺激越强。自组织过程主要完成对来自底层的刺激在特定的区域内给予响应, 其作用是非线性的, 刺激越集中, 频度越高, 其区域的响应就越牢固。

依据上述思想及信息融合的基本准则, 可以推断出复合性能应具有如下特点:

(1) 随着可融合子源数目的增加, 其复合性能是增加的, 即 F 是一个单调函数。

(2) 复合性能应不低于可融合子源中性能最好的一个。

(3) 由于可靠性越高的子源对整个系统的性能的贡献越大, 说明各子源是按照性能的可靠程度来影响复合性能的。

(4) 由于系统容错要求, 当各子源处于性能底限时, 融合结果应具有较高的容错性。

(5) 由于系统的准确性要求, 当各子源处于性能的高限时, 融合性能应有较大的提升。

由特点 2 可知, 设所有性能的取值在 0 到 1 之间, 则复合性能可写为: $PM = \max\{pm_1, pm_2\} + (1 - \max\{pm_1, pm_2\}) \times f(x)$, $x = w_1 \times pm_1 + w_2 \times pm_2$, w_1, w_2 为各子源复合加权, f 为单调增函数。权重 w_1, w_2 取决于各子源的性能。实验中我们就取为对应时刻毫米波和红外传感器的检测概率 P_{d1}, P_{d2} 。

由特点 4、5 可知, 函数 f 可以用 S 形函数表示, 即: $f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(x - \beta))}$, 参数 α 为 $f(x)$ 在点 $x = \beta$ 处的斜率, 反映了 $f(x)$ 在点 $x = \beta$ 处的变化快慢。参数 β 为分界点, 当 x 大于 β 时, 函数 $f(x)$ 随 x 增大而迅速增大; 当小于 β 时, $f(x)$ 随 x 减小而迅速减小。参数 α, β 的取值需要根据实际情况进行调整, 使之达到具体需求优化的性能。参数 α 取决于系统采用的融合方法, 参数 β 与可融合子源数目、性能等有关。在信息融合过程中, 当各子源性能相差很大时, 复合性能将降低。因此, 我们在实验中取参数 β 为毫米波和红外传感器的性能差的绝对值, 即 $\beta = |P_{d1} - P_{d2}|$ 。为了使复合性能在分界点处不产生大的阶跃, 取参数 $\alpha = 8$ 。

3 实验结果

下面是通过估计得出的毫米波和红外传感器在晴天下的性能曲线。激活毫米波和红外传感器的门限, 我们采用单独使用毫米波或红外时, 对它们各自性能的最低要求。自动生成的复合策略及复合性能曲线结果见图 1。算法依据各子源性能, 将弹目距离轴划分毫米波有效区、红外有效区, 它们重叠部分即为复合区。图 1 中 IR 曲线是红外性能曲线, MMW 曲线为毫米波性能曲线, COM 为算法实时生成的复合性能曲线。由图 1 可见在弹体飞向目标过程中, 毫米波雷达先激活。随着弹目距离 R 的缩小, 红外子源的性能超过其门限, 两子源同

时有效, 进入复合区 随着 R 的进一步缩小, 毫米波子源性能下降, 到一定程度后毫米波子源失效 当弹体非常接近目标后, 红外传感器也失效, 弹体借助于惯性飞向目标 在复合区, 估计出的复合性能比两子源性能都要高, 两子源性能相差最小时, 复合性能达到最大值 因为我们采用因素性能模型库技术, 在其它因素下的自动策略生成都归结为先验模型库的建立和扩充

选择毫米波和红外传感器的性能门限, 使整个系统达到最优的性能有待进一步研究 目前是基于经验, 使整个系统的性能得到某种程度的改善

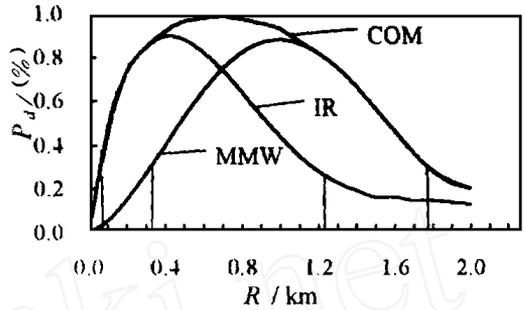


图 1 自动生成的复合策略及复合性能曲线结果

Fig. 1 The auto-formed combined strategy and performance curve

REFERENCES

- 1 LIXing-Guo. *Guidance and fuse* (李兴国, 制导与引信), 1995, (4): 1~ 6
- 2 CHEN Guang-Yu. *Infrared & Laser Technology* (陈光余, 红外与激光技术), 1995, 24(1): 22~ 27

STRATEGY AUTO-FORMATION ALGORITHM FOR MMW/IR FUSION*

LIXiang FU Yao-Wen ZHUANG Zhao-Wen LIU Yu-Lin

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The effects of environment and climate on millimeter wave (MMW) radar and infrared (IR) sensor were analyzed, and the environment and climate models of these two kinds of sensors were obtained. Then a strategy auto-formation algorithm for MMW/IR fusion based on these two models was presented. The combination performance was estimated and the strategy was auto-formed. At the end of this article a simulation result was given, which is in agreement with the preliminary analysis.

Key words sensors, fusion, strategy auto-formation.

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defence and the National Natural Science Foundation of China

Received 1997-12-22, revised 1998-05-04