

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.026

引用格式:王正海.战术数据链射频辐射特征控制技术[J].电讯技术,2014,54(5):668-673.[WANG Zheng-hai.RF Radiation Characteristics Control for Tactical Datalinks[J].Telecommunication Engineering,2014,54(5):668-673.]

战术数据链射频辐射特征控制技术*

王正海**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:传统的链路自适应技术只追求高效数据传输,会导致射频暴露,在电子战中无法保障数据链载体的安全性。以战术数据链主动射频隐身和高效通信为研究对象,利用多目标优化技术联合控制战术数据链的射频辐射特征(包含辐射时间、辐射功率和辐射波形),建立了一种战术数据链链路自适应技术模型。该模型以给定距离的截获概率和给定距离的可靠传输速率为二重优化目标,以辐射特征为优化变量,并以第四代宽带无线通信系统 LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) 的部分调制编码参数为实例,证实了由所述链路自适应技术模型优化所得的最优解可以同时实现数据链的射频隐身和高效数据传输。

关键词:通信对抗;战术数据链;射频隐身;链路自适应;多目标优化

中图分类号:TN919.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)05-0668-06

RF Radiation Characteristics Control for Tactical Datalinks

WANG Zheng-hai

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: In electronic warfare, RF exposures incurred by the traditional technique of radio link adaption, which purely maximizes the data rates, will jeopardize the carrier's safety of datalink systems. For active RF stealth and reliably efficient data transmission, this paper presents a link adaption model to jointly control the RF radiation characteristics (including radiation time, power and waveforms) for tactical datalinks. The proposed model applies multiple objective optimizations by modeling reliable communication rates and interception probabilities of RF signals from datalinks at given distance as double objectives, and radiation properties (including radiation time, power and waveforms) as variables. Using partial schemes of the modulations and coding of the 4th generation wideband wireless communications (Long Term Evolution-Advanced, LTE-A) as instances, the best solution shows that the active RF stealth and reliably efficient data transmission can be simultaneously achieved by the proposed model.

Key words: communication countermeasure; tactical data link (TDL); RF stealth; radio link adaption; multiple objective optimization

1 引言

移动无线信道存在快速和随机变化,为了保障高效地信息传输,移动无线通信系统都会采用链路自适应技术对通信系统的辐射参数进行动态调整,以使得在通信系统的接收端信道质量是平坦的。比

如,在以 LTE-A 等为代表的先进民用宽带无线通信系统中,链路自适应技术用于基于信道质量调整发射参数(包含发射功率、通信速率等),以在质量快速随机变化的无线信道中尽可能地提高传输速率^[1]。

* 收稿日期:2013-11-08;修回日期:2014-03-14 Received date:2013-11-08;Revised date:2014-03-14

** 通讯作者:wangzhhai@126.com Corresponding author:wangzhhai@126.com

和民用无线通信系统相比,军用战术通信系统(即数据链系统)存在显著的对抗性设计要求。在体系化的对抗性作战环境中,战术数据链需在对抗中生存,并完成信息共享^[2]。战术数据链面临的首要威胁便是敌无源探测系统对数据链射频信号的截获。在此基础之上,敌无源探测系统才能进行参数测量、分选识别、辐射源定位跟踪。进而,无源探测系统可引导电子干扰及攻击设备等对我方数据链及载体进行软杀伤和硬杀伤,最终严重威胁数据链的生存能力和作战效能^[2]。

因此,在对抗中主动实现射频信号隐蔽,并在质量快速随机变化的信道中实现可靠高效数据传输,是战术数据链需同时优化的两项目标。传统的链路自适应技术单纯追求尽可能高的传输速率,不考虑主动隐蔽数据链系统的射频特征,不适宜在战术数据链中使用。本文以占空比和编码调制方式可调的战术数据链为研究对象,以解决战术数据链射频信号主动隐蔽和高效通信问题为目的,给出了一种适合战术数据链的链路自适应技术模型,可对战术数据链的辐射特征进行优化控制,并基于民用第四代宽带无线通信系统 LTE-A 的部分波形参数,验证了本文所述技术模型的应用效果。

需要说明的是,在本文中除公式(2)和(3)外,其余公式中涉及能量、信噪比的变量均为对数域变量。本文探讨的数据链辐射特征包括辐射时间、辐射功率和通信速率。

2 数据链辐射特征与射频信号隐蔽及通信性能的关系分析

本节简要总结数据链辐射特征控制,并重点分析辐射特征与数据链射频信号隐蔽及通信性能的关系,为后文建立战术数据链的链路自适应技术模型奠定技术基础。

2.1 辐射特征控制

在通信系统中,辐射时间控制的目的在于使授权终端在合适的时机辐射合法的时间长度,避免非授权辐射导致的干扰,可用时隙长度和占空比来定量描述数据链的辐射时间特征。

动态辐射功率控制用于动态调整无线链路的辐射功率以保持接收端获得近似恒定每比特能量与噪声功率谱密度的比值,用 E_b/N_0 表示。在辐射功率控制中,辐射功率始终与信道质量成反比,不管信道质量如何变化,传输速率总保持恒定。

在民用系统中,从用户的角度而言,在无线链路上传输速率越高越好。动态速率控制作为另外一种链路自适应技术,替代了功率控制。速率控制保持最大辐射功率动态调整传输速率以补偿信道质量的变化,调整的目标是保持接收端以要求的 E_b/N_0 恢复传输数据。在高信道质量的情况下,增加数传速率;反之,降低数传速率^[1]。

在无线通信系统中,速率控制通过在预定的波形集合中选择合适的通信波形来实现。量化表征通信波形的指标包含通信速率和准确解调所需的最小 E_b/N_0 。辐射波形、通信速率和 E_b/N_0 存在一一对应关系。

2.2 辐射特征对射频信号隐蔽影响

在通信对抗中,危及数据链安全的首要问题是敌无源探测系统对通信射频辐射信号的截获。在空空场景中,在雷达作用范围之外的机载无源探测系统对数据链存在巨大威胁。另外,在空地场景中,地面无源探测系统对机载数据链打地信号的截获,是机载数据链的重要威胁源^[2-3]。在上述两种威胁中,可以用一个共同的特征来定量描述非合作无源探测系统对机载数据链安全性的威胁,即在给定距离上的截获概率。比如,在空空场景中,非合作无源探测系统对机载数据链载体安全性的威胁可以定量描述为在机载雷达最大作用距离处的截获概率。在空地场景中,非合作无源探测系统对机载数据链安全性的威胁可以定量描述为在机载数据链信号打地距离上的截获概率。

数据链射频信号在给定距离 d 上被敌无源探测系统截获的概率,用 P_I^d 表示。 P_I^d 是空间、时间、频率域三重窗口的重合概率和能量域检测概率的乘积^[3]。在本文中,假设无源探测系统的前端截获模型是宽带辐射计,则无源探测系统对数据链副瓣射频信号的截获概率可以表示为时域窗口的重合概率和能量域检测概率之积,因此,

$$P_I^d = \frac{\min(\text{duty} \cdot t_s, T)}{T} P_D \quad (1)$$

式中, T 表示辐射计的积分时间, t_s 表示数据链的时隙长度, duty 表示数据链射频信号的占空比; $\frac{\min(\text{duty} \cdot t_s, T)}{T}$ 量化了辐射计积分时间窗口和数据链射频信号持续时间窗口的重合概率; P_D 表示能量域的检测概率。当辐射计积分时间 T 和前端滤波器带宽 W 的乘积 $TW \gg 1$ 时, P_D 可表示为^[4]

$$P_D \approx \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{2 \cdot T \cdot W} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{FA}) - E_s/2 \cdot N_0}{\sqrt{2 \cdot (T \cdot W + E_s/N_0)}} \right] \quad (2)$$

式中, P_{FA} 表示无源探测系统的虚警概率, E_s/N_0 表示无源探测系统截获数据链系统射频信号能量与单边带噪声功率谱密度比值的 2 倍, 可表示为

$$E_s/N_0 = 2 \cdot \frac{p_t \cdot G_{Tc} \cdot G_{Rl} \cdot \min(duty \cdot t_s, T)/L_p}{N_0} \quad (3)$$

式中, p_t 表示数据链系统的辐射功率, G_{Tc} 表示数据链发射系统的增益, G_{Rl} 表示无源探测系统的接收增益, L_p 表示数据链系统射频辐射信号的传播损耗。

2.3 辐射特征对通信性能的影响

通信性能需从通信速率、通信可靠性角度描述。通信可靠性用误比特率描述, 误比特率只需保障通信系统应用所提的可靠性需求即可。比如, 在话音通信中, 误比特率只要不高于 10^{-5} 即可。在合理条件下, 控制数据链的辐射特征以尽可能提供高的通信速率, 从而增强数据链系统的信息共享能力。

为保证数据链端机以要求的误比特率解调通信信号, 则数据链接收端接收到的通信信号功率应满足通信波形的灵敏度要求, 即

$$p_r \geq P_{min}^r = N_0 + E_b/N_0 + 10 \lg r_b + M_0 \quad (4)$$

式中, E_b/N_0 表示通信速率 r_b 对应通信波形可靠解调所需每比特能量与噪声功率谱密度的比值; M_0 表示数据链系统的链路余量; P_{min}^r 表示 r_b 对应通信波形的数据链端机接收灵敏度; p_r 表示数据链端机接收到的通信信号功率, 可表示为

$$p_r = p_t + G_{Tc} + G_{Rc} - L_p \quad (5)$$

式中, p_t 、 G_{Tc} 、 G_{Rc} 、 L_p 分别表示数据链系统的辐射功率、发射系统增益、接收系统增益、传播损耗。

由公式(4)和(5)可知, 数据链系统可靠通信时的通信速率与辐射功率存在如下关系:

$$10 \lg r_b \leq p_t - L_p + G_{Tc} + G_{Rc} - E_b/N_0 - N_0 - M_0 \quad (6)$$

3 战术数据链辐射特征控制技术

从前文的分析可知, 在隐身作战中, 数据链的射频隐身能力和通信能力分别可用给定距离的截获概率和可靠通信速率来描述。并且, 给定距离的截获概率和可靠通信速率都与数据链的辐射特征相关。为达到同时实现数据链射频信号主动隐蔽和高效通信的目的, 本节将建立适合战术数据链的链路自适应技术模型, 联合优化战术数据链的辐射时间、辐射功率和通信速率特征。

3.1 战术数据链链路自适应技术模型

战术数据链系统的链路自适应技术需同时优化数据链的射频隐身能力和通信性能。优化问题的解空间由辐射时间、辐射功率和辐射波形组成, 优化模型的约束条件包括给定距离的数据链信号的被截获概率小于门限值和给定通信距离的通信波形要被可靠解调。因此, 在隐身作战应用中, 战术数据链的链路自适应技术可以建模为式(7)所示的最优化问题:

$$F(t_s, duty, p_t, r_b) = (\min f_1(t_s, duty, p_t, r_b), \max f_2(t_s, duty, p_t, r_b))$$

Subject to:

$$p_r \geq P_{min}^r$$

$$P_t^d < P_{th}^l$$

$$R_c = R$$

$$R_l = d$$

where:

$$p_t \in \{P_t\}$$

$$r_b \in \{R_b\}$$

$$t_s \in \{T_s\}$$

$$duty \in \{Duty\} \quad (7)$$

式(7)中, 优化目标 f_1 表示数据链系统射频信号在给定距离 d 上被敌无源探测系统截获的概率 P_t^d , 即 $f_1 = P_t^d$ 。如公式(1)~(5)所示, f_1 是辐射特征(辐射时间、辐射功率和辐射波形)的函数。优化目标 f_2 表示数据链系统的实际通信速率, f_2 与辐射波形和辐射时间有关^[5], 即

$$f_2 = duty \cdot t_s \cdot r_b \quad (8)$$

式(7)中, 第一个约束条件表示数据链端机接收到通信信号的功率应不低于辐射波形的解调灵敏度, 以保障通信波形能被接收端可靠解调, 该约束条件的数学表达式为公式(4); 第二个约束条件表示在离开数据链辐射源 d 处的截获概率 P_t^d 应小于截获概率门限值 P_{th}^l , 该门限值是数据链载体提出的最低安全性要求, P_t^d 的数学表达式为公式(1); 第三个和第四个约束条件分别给出了通信距离和截获距离要求。

式(7)中, $\{P_t\}$ 、 $\{R_b\}$ 、 $\{T_s\}$ 和 $\{Duty\}$ 分别给出解空间中辐射功率、辐射波形和辐射时间的取值范围, 其物理意义为可用的辐射功率等级、可选通信波形、可选时隙长度、可选占空比。

3.2 模型求解

在式(7)中, 优化目标 f_1 量化了数据链系统辐射射频信号对数据链载体安全性带来的威胁, 此目

标的优化方向是越小越好,值域为 $[0 \sim 1]$;优化目标 f_2 量化了数据链系统辐射射频信号对载体的信息保障能力,此目标的优化方向是越大越好,该目标的取值通常远大于 1,其值域由公式(8)确定。因此,为求解式(7)所示模型,首先需调整第一个目标函数的优化方向,并对第二个目标进行归一化。这两步变换使得两个目标具备相同的优化方向,同时具有相近的值域。最后,通过线性加权将两目标优化问题转化为单目标最大化问题,从而使得可采用单目标优化的算法简化模型(7)的求解。通过上述变换,得到如式(9)所示的单目标优化模型:

$$\max w_1(\tilde{f}_1) \cdot \tilde{f}_1 + w_2(\tilde{f}_2) \cdot \tilde{f}_2$$

Subject to:

$$\begin{aligned} p_r &\geq P_{\min}^{r_b} \\ P_l^d &< P_{th}^l \\ R_c &= R \\ R_l &= d \end{aligned}$$

where:

$$\begin{aligned} p_t &\in \{P_t\} \\ r_b &\in \{R_b\} \\ t_s &\in \{T_s\} \\ duty &\in \{Duty\} \\ w_1(\tilde{f}_1) &= \begin{cases} \infty, & \tilde{f}_1 = P_{th}^l - f_1 \leq 0 \\ \alpha, & \tilde{f}_1 = P_{th}^l - f_1 > 0 \end{cases} \\ w_2(\tilde{f}_2) &= \begin{cases} \beta, & \tilde{f}_2 = \frac{f_2 - f_2^{th}}{\max\{f_2\}} < 0 \\ \lambda\beta, & \tilde{f}_2 = \frac{f_2 - f_2^{th}}{\max\{f_2\}} \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{9}$$

式(9)中,优化目标的第一项 $w_1(\tilde{f}_1) \cdot \tilde{f}_1$ 量化了截获概率 P_l^d 对总优化目标的贡献; P_{th}^l 表示载体安全性对数据链系统射频隐身能力提出的截获概率门限要求,为了保证安全性,在距离 d 处数据链射频信号的截获概率必须低于该截获概率门限值。从公式(9)的单目标优化模型可以看出,当 $P_l^d \geq P_{th}^l$ 时,即优化问题的解无法满足载体安全性时,赋给目标函数负无穷大的惩罚值,强迫优化问题的解满足载体安全性的要求。当 $P_l^d < P_{th}^l$ 时,即优化问题的解满足载体的安全性要求时,赋给目标函数较大的收益值 α ,鼓励优化问题的解收敛于满足载体平台安全性要求的解空间。

式(9)中,优化目标的第二项 $w_2(\tilde{f}_2) \cdot \tilde{f}_2$ 量化了归一化通信速率 $\tilde{f}_2$ 对总优化目标的贡献, f_2^{th} 表示

为保障数据链载体良好的信息共享能力,载体任务系统对数据链实际通信速率提出的门限要求,即当通信速率 $f_2 \geq f_2^{th}$ 时,数据链系统能够很好地保障载体的信息共享能力。在数据链的战术使用中,信息共享能力可以适当降级,以保障载体安全。从式(9)的单目标优化模型可以看出,当 $f_2 < f_2^{th}$ 时,优化问题的解不能满足载体信息共享能力的要求,此时,赋给目标函数较大的惩罚值 β ,鼓励优化问题的解收敛于满足载体信息共享能力的解空间。当 $f_2 \geq f_2^{th}$ 时,优化问题的解满足载体信息共享能力的要求。这种情况下,赋给目标函数一定的收益值 $\lambda\beta$ (其中 $0 < \lambda < 1$),以适度鼓励优化问题的解收敛于满足载体信息共享能力的解空间。

当满足了载体安全性的门限要求后,式(9)中的常量 α 、 β 和 λ 的相对取值大小反映了数据链战术使用策略的偏好,即当使用策略更偏好提高信息共享能力时,则应给 β 和 λ 赋予相对更大的值;反之,当使用策略更偏好提高载体平台的安全性时,则应给 α 赋予相对更大的值。无论常量 α 、 β 和 λ 的相对取值情况如何,常量 α 、 β 和 λ 的值都远小于 ∞ ,这使得载体平台的安全性门限具备对式(9)非法解的否决权,从而强迫式(9)的解满足载体平台的安全性门限要求。

4 模型验证和分析

本文验证所用的信道编码和调制方案都来自于LTE-A采用的Turbo码和调制方案。为对式(9)所示的链路自适应技术模型进行验证和分析,本文依据表1和表2所示的基本假设对公式(1)~(9)中的模型参数进行初始化。

表 1 模型验证基本条件		
Table 1 Parameters for model verifications		
模型	参数项	数值
数据链系统	符号速率/(Msymbol/s)	32
	时隙长度/ms	5
	最大占空比/(%)	60
	收发天线增益之和/dB	30
	载波频率/GHz	30
	最大辐射功率/dBm	100
	最小辐射功率/dBm	20
	最小功率步进/dB	4
	链路余量/dB	9
数据链终端	噪声本底/(dBm/Hz)	-167

续表 1

截获接收机	前端滤波器带宽/MHz	40
	积分时间/ms	5
	虚警概率	10^{-8}
	噪声本底/(dBm/Hz)	-167
信道	信道模型	自由空间视距传播模型
	大气吸收损耗/(dB/km)	0.02
优化模型	常数 α	100
	常数 β	100
	常数 λ	0.7

表 2 验证采用的数据链辐射特征参数
Table 2 Parameters of RF radiation characteristics of datalinks used in model verifications

序号	调制方式	编码码率	占空比/(%)	$(E_b/N_0)/\text{dB}$	实际通信速率/(Mb·s ⁻¹)
1	BPSK ($Q=1$)	$R=0.33$	10	2.1	1.1
2	QPSK ($Q=2$)	$R=0.33$	10	2.1	2.1
3	BPSK ($Q=1$)	$R=0.54$	25	2.7	4.3
4	QPSK ($Q=2$)	$R=0.54$	25	2.7	8.6
5	16QAM ($Q=4$)	$R=0.54$	25	7.4	17.3
6	16QAM ($Q=4$)	$R=0.54$	50	7.4	34.6
7	64QAM ($Q=6$)	$R=0.75$	50	16.0	72.0
8	64QAM ($Q=6$)	$R=0.88$	60	18.5	101.4

基于表 1 和表 2,确定式(9)所示的模型参数、辐射时间、辐射功率等级以及辐射波形的解空间后,可用穷举法获得模型的最优解。

为了保障数据链系统载体的安全性和信息共享能力,假设截获概率门限值为 $P_{th}^I=10^{-4}$,通信速率门限为 $f_2^{th}=5\text{ Mb/s}$,通信距离 $R=150\text{ km}$,当无源探测系统接收天线无增益时,通过模型求解,得到表 2 中 8 种可选辐射特征参数的收益值、辐射功率等级,以及 $d=400\text{ km}$ 处的截获概率,如表 3 所示。

表 3 链路自适应技术模型的优化结果
Table 3 Optimized results of link adaption model

序号	收益值	辐射功率等级/dBm	截获概率/6 dBm
1	-2.7	56	1.1×10^{-9}
2	-2.0	56	1.1×10^{-9}
3	-0.5	56	3.1×10^{-8}
4	2.5	60	4.2×10^{-9}
5	8.4	68	5.6×10^{-8}
6	20.4	68	1.9×10^{-6}
7	负无穷	80	0.5
8	负无穷	84	0.6

从表 3 可以看出,表 2 中序号 6 对应的辐射特征参数和辐射功率等级68 dBm是公式(9)所示模型的最优解。从表 3 所示的验证结果可知,在隐身作战中,传统的链路自适应技术在可用辐射功率约束下单纯追求通信速率的优化,序号 8 对应的辐射特征参数和辐射功率等级84 dBm将是传统链路自适应技术的优化解,该优化解将使400 km处数据链系统辐射射频信号的截获概率达到 60%,导致严重的射频暴露,危及数据链载体的安全。与之对比,公式(9)所示模型紧密耦合射频隐身战术应用,同时追求载体平台安全性和信息共享能力的最优化,可以同时获得优化的信息保障能力和平台安全性,优化解在400 km处的截获概率 $P_7^{400}=1.9\times10^{-6}$,实际截获概率低于门限截获概率值,同时实际通信速率也达到了 $f_2=34.6\text{ Mb/s}$,大于平台信息保障能力对门限通信速率的要求。

另外,假设截获概率门限值为 $P_{th}^I=10^{-4}$,通信速率门限为 $f_2^{th}=10\text{ Mb/s}$,通信距离 $R=150\text{ km}$,当无源探测系统接收天线的增益为10 dB时,通过模型求解,得到表 2 中 8 种可选辐射特征参数的收益值、辐射功率等级,以及 $d=400\text{ km}$ 处的截获概率,如表 4 所示。

表 4 链路自适应技术模型的优化结果
Table 4 Optimized results of link adaption model

序号	收益值	辐射功率等级/dBm	截获概率
1	-9.1	56	2.3×10^{-9}
2	-5.4	56	2.3×10^{-9}
3	-3.9	56	1.9×10^{-8}
4	-1.0	60	3.0×10^{-7}
5	负无穷	68	0.1
6	负无穷	68	0.5
7	负无穷	80	0.5
8	负无穷	84	0.6

从表 4 可以看出,表 2 中序号 4 对应的辐射特征参数和辐射功率等级 60 dBm 是公式(9)所示模型的最优解。

对比表 3 和表 4 的验证条件和验证结果可知,由于无源探测系统接收天线增益的提高,机载数据链载体面临的被截获威胁更严重。在更危险的环境中,载体任务系统却提出更高的信息保障要求,当最优解无法同时满足载体的安全性和信息保障能力时,公式(9)所示模型将会对数据链的通信速率进行降级(实际通信速率从 10 Mb/s 降低到 8.6 Mb/s),强迫最优解满足数据链载体的安全性要求。这种情况下,最优解所对应数据链副瓣辐射射频信号在 400 km 处的截获概率为 $P_I^{400} = 3.0 \times 10^{-7}$,小于截获概率门限值要求,能够保证载体的安全性。

5 总 结

在隐身作战中,为同时实现在对抗中主动射频信号隐蔽和在质量快速随机变化的信道中可靠高效传输数据,本文利用多目标优化技术建立了一种链路自适应技术模型。将战术数据链的射频隐身能力和可靠通信能力作为优化问题的两个目标,以数据链的辐射特征(包括辐射时间、辐射功率、辐射波形)作为优化变量,分别用给定距离处的截获概率和给定距离的可靠通信速率来量化射频隐身能力和通信性能。

在占空比和编码调制方式可变的战术数据链中,以 LTE-A 采用调制编码方案的部分参数作为实例,验证了本文所述战术数据链链路自适应技术模型的优势。量化对比分析显示出传统的链路自适应技术在可实现条件下单纯追求通信速率的最大化,不宜在隐身作战中使用。在可行数据链辐射特征解空间,利用本文所建模型可以优化控制数据链辐射特征,同时保证数据链载体的安全性和信息共享能

力。另外,在危险环境中当载体任务系统对数据链提出高信息共享能力需求的极端情况下,本文所建模型可对数据链的数传速率进行优化降级,以优先保障安全性。

参考文献:

- [1] Erik D, Stefan P, Johan S, et al. 3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband [M]. 2nd ed. Beijing: Academic Press, 2010.
- [2] 熊群力, 陈润生. 综合电子战-信息化战争的杀手锏 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2010.
XIONG Qun-li, CHEN Run-sheng. Integrated Electronic Warfare: the Killer of Information Warfare [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [3] David L J. Introduction to RF Stealth [M]. Ohio: SciTech Press, 2004.
- [4] Khatib H H. Theater Wideband Communications [C]// Proceedings of 1997 IEEE Military Communications Conference. Monterey, California: IEEE, 1997: 378-382.
- [5] 梅文华, 蔡善法. JTIDS/Link16 数据链 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
MEI Wen-hua, CAI Shan-fa. JTIDS/Link16 Data Links [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:



王正海(1982—),男,湖北随州人,2011 年于武汉大学获通信与信息系统专业博士学位,现为工程师,主要研究方向为数据链和机载传感器系统。

WANG Zheng-hai was born in Suizhou, Hubei Province, in 1982. He received the Ph. D. degree in Communication and Information Systems from Wuhan University in 2011. He is now an engineer. His research concerns datalinks and airborne sensor systems.

Email: wangzhhai@126.com