

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.08.015

引用格式:徐胜,崔雨勇.分布式数据链战场态势误差评估[J].电讯技术,2015,55(8):913-918. [XU Sheng, CUI Yuyong. Battlefield Situation Error Assessment of Distributed Data Link [J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(8): 913-918.]

分布式数据链战场态势误差评估*

徐 胜¹,崔雨勇^{2,**}

(1. 海军装备部 航空订货部,北京 100841;2. 中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:为了衡量数据链系统提供信息的准确性和可靠性,从数据链消息发送的机理出发,提出了一种基于马尔科夫过程的误差传递分析方法,建立了态势指标与网络、传感器影响因素的关联策略,有效解决了衡量数据链消息多因素影响和战场态势的准确性问题。仿真结果表明了分布式数据链的态势误差分布与传感器误差、网络变化误差模型的有效性,证明所提误差估计方法具有可行性和可操作性。

关键词:分布式数据链;战场态势;误差评估;马尔科夫链;误差传递

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)08-0913-06

Battlefield Situation Error Assessment of Distributed Data Link

XU Sheng¹, CUI Yuyong²

(1. Aeronautic Equipment Order Office, Navy Equipment Department, Beijing 100841, China;
2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract:To measure the accuracy and reliability of the information provided by data link system, an error transfer method based on the Markov chain is proposed according to data link message transferring mechanism, a quantification description between the situation indicator and influencing factor is provided to solve the problem of measuring the battlefield situation accuracy by multi-factor effect. Simulation shows the effectiveness of the model and proves the feasibility and operatability of the propsed error assessment method.

Key words:distributed data link; battlefield situation; error assesment; Markov chain; error transfer

1 引 言

随着数据链技术的发展,战术数据链信息分发形成战场实时态势的需要越来越明确,分布式战场态势的评价体系显得越来越重要。战场态势的数据链系统信息根据不同的报告职责形成统一的网内态势,其信息内容主要包括有效的目标位置信息和探测到的目标信息,甚至是目标关联和融合信息、情报信息等信息。

由于数据链系统所处环境复杂,战场态势评价指标的选取是一个比较复杂的过程。态势信息的实

时性、统一性、完整性、连续性作为统一态势的评价指标,而战场态势信息的形成依赖于具有报告职责的每个单元的信息质量,从数据链目前信息分发的结构分析,在同一时隙下分发的目标位置精度是最高的,但是由于网络状况、各个传感器探测精度、融合策略等的影响,使战场态势信息的显示和评价受多方面因素的影响。为了更合理有效地评价态势和其信息因素的影响,刘邈^[1]就数据链网络环境测试进行了相关研究,而有学者采用变精度粗糙集对态势信息进行了评估。但是,对于如何建立多变量的

* 收稿日期:2014-09-23;修回日期:2015-04-24 Received date:2014-09-23;Revised date:2015-04-24
** 通讯作者:cyy_1999@126.com Corresponding author:cyy_1999@126.com

误差变化引起的态势信息变化,各个传感器的检测及准确性对态势的贡献,如何建立有效的衡量态势信息和战场环境指标关系,完成其态势信息的估计及计算,国内鲜有报道。同时,完整考察战场态势也需要实时分析网络情况及各个平台传感器状态。本文从误差传递入手,试图通过建立误差分析模型进行研究,分析态势影响因素与其评价指标的关系。

2 问题分析

2.1 问题描述

战场态势信息包括空、海、地、空、水下的监视信息与电子对抗情报信息以及环境信息等。为了形成实时、统一的战场态势,更加有效地表达战场态势的质量和完整性,态势目标信息的优劣衡量指标体系是客观描述态势的主要手段,该指标体系应该具有可靠性与可测试性。数据链作为多作战平台之间的战术信息交换的重要手段,在现代战争的 C4ISR 系统中的作用越来越明显^[2]。对于数据链系统传输信息而言,重要的目的之一就是平台之间共享位置信息和属性信息。

2.2 误差传递理论

在现实世界中,由于获取的物理量是通过人为设置手段完成的,这种手段获取的信息多是观测值直接得到或间接得到。由于观测值存在误差,必然使得求算的结果存在误差。为了能够比较客观准确地评价结果的误差范围,在求解过程中需要考察观测值的误差传递模型推导最后的结果误差范围。但是,在实际中,误差传递的规律是复杂的,然而庆幸的是,大多数情况下,误差模型都符合正态分布规律(即使不符合正态分布规律,在长时间观测的情况下,也可以近似认为其符合正态分布规律)。针对分布式数据链信息的传递,可以看成是多变量、非线性的误差传递问题。

假设观测的 X 为 n 列的观测矩阵, Y 为 m 维的待求量,则 Y 与 X 的关系可以用 m 个非线性函数进行表征:

$$Y_i=f_i(X_1,X_2,\cdots,X_n),i=1,2,\cdots,m。(1)$$

对以上 m 个非线性函数求微分可以得到如下表达:

$$dY_i=\left(\frac{\partial f_i}{\partial X_1}\right)dX_1+\left(\frac{\partial f_i}{\partial X_2}\right)dX_2+\cdots+\left(\frac{\partial f_i}{\partial X_n}\right)dX_n。(2)$$

式中, $i=1,2,\cdots,n$ 。写成矩阵形式如下:

$$Y=\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix},dY=\begin{bmatrix} dY_1 \\ dY_2 \\ \vdots \\ dY_m \end{bmatrix},$$
$$K=\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}。(3)$$

根据上式,可得到如下表达式:

$$dY=K \cdot dX。(4)$$

根据协方差传播定律^[3],可求得 Z 的协方差矩阵:

$$D_{YY}=K \cdot D_{XX} \cdot K^T。(5)$$

该方法对于观测误差可得的情况具有易观测及易描述的特点,对于数据链系统而言,由于其分布式的特点,同时其传输的类型和数据存在差异、网络环境的可靠性等问题,基本上不可能用统一的表达式进行描述。为了有效描述数据链系统节点战场态势的信息可靠性,需要分析其信息的误差来源。

2.3 分布式战场态势数据链信息误差来源分析

数据链系统战场态势是各参与平台发送的有关目标探测、自身平台报告等相关信息形成的统一报告。在分布式数据链系统情况下,单个节点的信息受到周围所有具有分发能力的节点的影响,其分布式网络架构中每个节点的信息分发都具有同等地位,其4个节点铰链关系如图1所示。

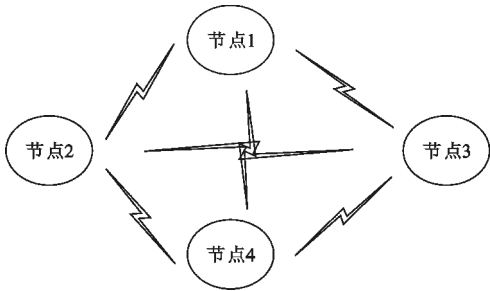


图1 分布式数据链信息分发示意图
Fig.1 Schematic diagram of distribution of distributed information of data link

根据获取数据的源类型和源信息,从两个节点

信息交互过程分析得到态势信息的来源和信息的可靠性。其主要受影响的因素有如下几点:

雷达探测概率($X1$),指雷达探测能力的差异,直接决定网内报告目标成员数目的准确性;

探测虚警率($X2$),指雷达共同探测的虚警率;

雷达探测精度差($X3$),指多部雷达探测精度造成的精度差;

融合算法可信度($X4$),指自身与数据链消息融合的可信度,表明融合的策略是否满足;

航迹相关可信度($X5$),指本地航迹与数据链多平台航迹的相关可信度;

链路质量($X6$),指多平台链路联通的总质量;

平台态势分发度($X7$),指单平台在态势信息中的分发情况。

根据形成态势的原因及分析,考察在以上因素影响下态势的形成问题、影响过程以及指标变化。根据具体战场态势的需求,考察态势的指标一般有态势完整性($Y1$)、态势实时性($Y2$)、态势的一致性($Y3$)和态势的连续性($Y4$)。在以上影响因素分析的基础上,建立影响因素与态势指标关系模型。

2.4 分布式战场态势数据链信息性能分析

分布式战场态势数据链信息的变化受 2.3 节 $X1 \sim X7$ 指标的影响,为了理论分析这些因素对战场态势的影响,从上述影响因素的可靠性进行分析,其统计量是受到时间累积影响的,随着时间的推移,可以将其表示成一个与时间相关的函数。由于当前时刻的状态与历史时刻状态具有关联性,依次类推,可以把时间累积过程近似认为当前时刻仅仅由上一时刻的状态决定,忽略上一时刻以前对其状态的贡献,即影响因素是一阶马尔科夫过程^[4-5],具体意义为下一个时刻系统的状态仅与当前时刻系统所处的状态相关,与当前时刻以前的系统状态无关^[6-7]。对于单节点而说,接收消息是时间离散、状态离散的过程,该接收模式符合马尔科夫过程^[8]。因此,采用马尔科夫链相关理论分析分布式数据链环境下战场态势的可靠性、一致性、实时性、完整性是一种比较可靠的方法,下面对其过程进行具体分析描述。

假设数据链网络内成员数目为 N ,因此,网络中最多有 N 个成员在发送数据。如图 2 所示,该马尔科夫链有 $N+1$ 种状态,其中 λ_i 与 μ_i 分别表示其状态转移概率。

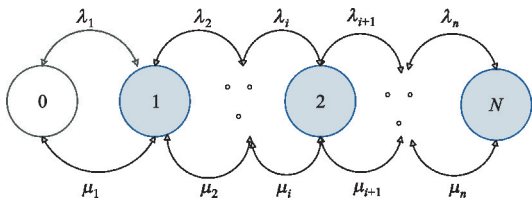


图 2 马尔科夫过程状态转移图
Fig. 2 State transition diagram of Markov

该马尔科夫过程的稳态分布可以表示如下:

$$\pi_i = \left[\left[1 + \sum_{j=1}^N \left(\frac{\prod_{k=0}^{i-1} \lambda^k}{\prod_{l=1}^j \mu^l} \right) \right]^{-1} \left(\frac{\prod_{k=0}^{i-1} \lambda^k}{\prod_{l=1}^i \mu^l} \right) \right] \quad (6)$$

通过该过程的分析可以看出,当前节点接收的目标信息受前一时刻信息的影响。在实际中,我们知道,当前系统的状态受到前一时刻信息和当前接收信息共同影响,可通过分析各成员传输信息的可靠性和实时性,完成分布式数据链消息战场态势信息性能的分析。根据上述假设,分布式数据链网络内有 N 个成员,共有 $N+1$ 种状态,则单节点的状态从 i 到 $i+1$ 可以表示为 λ_N^i, λ_N^i 由网内成员单独独立播报探测信息的概率 λ_N (该值与雷达相关指标相关)、网内成员重复播报探测信息的概率 $p\lambda_N$ (该值与分布式探测的战区覆盖重叠相关)、由于网络延迟或单节点自身原因延迟播报的平均概率 $\bar{\lambda}$ (该值与网络可靠性成反比关系,网络越可靠,延迟播报的可能性越低,反之亦然) 三部分组成,则可以得到状态转移值为

$$\lambda_N^i = \lambda_N + p\lambda_N + \bar{\lambda} \quad (7)$$

从状态 i 转移到状态 $i-1$ 记为 μ_N^i ,考察平台本身融合算法的可靠性,表现为目标的覆盖率 μ_p 和多平台报告的交互率 μ_d (表现为报告职责的变更)。在分析中,可能同时存在 i 个成员与考察成员交互,则

$$\mu_N^i = i \cdot \mu_p \cdot (1 - \mu_d) \quad (8)$$

对于以上两个概率值,如果存在 N 个状态,则满足所有状态转移概率之和为 1。通过统计值进行求解,则归一化概率值为

$$\lambda_N^i = \frac{\lambda_N^i}{\sum_{i=1}^N \lambda_N^i} \quad (9)$$

同理可得

$$\mu_N^i = \frac{\mu_N^i}{\sum_{i=1}^N \mu_N^i} \quad (10)$$

通过对具体节点状态的考察,形成分析节点能力的指标,在一般文献中,该指标均给出的是一种平均值。本文通过分析,给出其一段时间的统计值,通

过时间的累积,给出的值会趋于一个临界值,则一般选取该临界值作为平均值。

通过误差传递和马尔科夫链进行分析建模,可以建立误差传递马尔科夫过程。利用公式(5),可以设置如下:

$$\begin{bmatrix} p_t(X_1) \\ p_t(X_2) \\ p_t(X_3) \\ p_t(X_4) \\ p_t(X_5) \\ p_t(X_6) \\ p_t(X_7) \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} p_{t-1}(X_1) \\ p_{t-1}(X_2) \\ p_{t-1}(X_3) \\ p_{t-1}(X_4) \\ p_{t-1}(X_5) \\ p_{t-1}(X_6) \\ p_{t-1}(X_7) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{H}$ 是状态转移矩阵,则根据态势统一的 4 个指标,应该满足下式:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \mathbf{F} \cdot \begin{bmatrix} p_t(X_1) \\ p_t(X_2) \\ p_t(X_3) \\ p_t(X_4) \\ p_t(X_5) \\ p_t(X_6) \\ p_t(X_7) \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于 $\mathbf{F}$ 是一个非线性矩阵,因此无法明确给出,其取值受到影响因素的制约。将式(11)代入式(12),可得如下表达:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \mathbf{F} \cdot \begin{bmatrix} p_t(X_1) \\ p_t(X_2) \\ p_t(X_3) \\ p_t(X_4) \\ p_t(X_5) \\ p_t(X_6) \\ p_t(X_7) \end{bmatrix} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} p_{t-1}(X_1) \\ p_{t-1}(X_2) \\ p_{t-1}(X_3) \\ p_{t-1}(X_4) \\ p_{t-1}(X_5) \\ p_{t-1}(X_6) \\ p_{t-1}(X_7) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

则两边取微分可以得到

$$\begin{bmatrix} dY_1 \\ dY_2 \\ dY_3 \\ dY_4 \end{bmatrix} = d\mathbf{F} \cdot \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} p_{t-1}(X_1) \\ p_{t-1}(X_2) \\ p_{t-1}(X_3) \\ p_{t-1}(X_4) \\ p_{t-1}(X_5) \\ p_{t-1}(X_6) \\ p_{t-1}(X_7) \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,通过将指标的考核转换为对指标变化率的考核,变化率的求取比真值的获取更具有可取性。通过对变化率的求取,可以在一定程度上反映分布式数据链战场态势的性能。

根据式(14),要确定战场态势的变化率,仍需要确定 $d\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{H}$,其中 $\mathbf{H}$ 为状态转移矩阵,按照式(7)~(10)确定。 $d\mathbf{F}$ 是非线性的表达式,表达态势信息随当前网络及各种影响因素的综合影响。可以看出,其与雷达本身的探测性能、网络性能和算法融合以及航迹相关的质量都存在关系,多因素的影响不能给出确定的表达式。为了描述该特性,可以利用其某些规律定义其 $d\mathbf{F}$ 的变化率来反映态势,如链路质量越高则态势越可靠,雷达的虚警率越低则态势越可靠。根据这些结论,可以粗略地给出 $d\mathbf{F}$ 的变化矩阵来反映其规律:

$$d\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y_1}{\partial X_1} & \frac{\partial Y_1}{\partial X_2} & \frac{\partial Y_1}{\partial X_3} & \frac{\partial Y_1}{\partial X_4} & \frac{\partial Y_1}{\partial X_5} & \frac{\partial Y_1}{\partial X_6} & \frac{\partial Y_1}{\partial X_7} \\ \frac{\partial Y_2}{\partial X_1} & \frac{\partial Y_2}{\partial X_2} & \frac{\partial Y_2}{\partial X_3} & \frac{\partial Y_2}{\partial X_4} & \frac{\partial Y_2}{\partial X_5} & \frac{\partial Y_2}{\partial X_6} & \frac{\partial Y_2}{\partial X_7} \\ \frac{\partial Y_3}{\partial X_1} & \frac{\partial Y_3}{\partial X_2} & \frac{\partial Y_3}{\partial X_3} & \frac{\partial Y_3}{\partial X_4} & \frac{\partial Y_3}{\partial X_5} & \frac{\partial Y_3}{\partial X_6} & \frac{\partial Y_3}{\partial X_7} \\ \frac{\partial Y_4}{\partial X_1} & \frac{\partial Y_4}{\partial X_2} & \frac{\partial Y_4}{\partial X_3} & \frac{\partial Y_4}{\partial X_4} & \frac{\partial Y_4}{\partial X_5} & \frac{\partial Y_4}{\partial X_6} & \frac{\partial Y_4}{\partial X_7} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$d\mathbf{F}$ 的求取可以通过设定初值,根据其在不同时刻的差值进行计算,从而有效求取出态势的变化情况。

3 仿真分析

为了描述影响态势的因素在实际使用中的应用存在的问题,假设网内存在 7 个节点,雷达探测率设置在 75%~85%,初始值设为 80%,雷达虚警率 1.5%~2%,初始值设为 1.75%。雷达探测的精度差在 3°范围内,融合算法的可信度为 99%~100%,初始值设置为 99%。航迹相关可信度 99%~100%,初始值设为 99%。链路质量在 99%以上,初始值设为 99%,平台态势分发度为 0.97,初始值为 1。

实验过程中,除本身平台外,模拟 16 个目标进行性能统计,主要考察其中一个节点,则通过建立局域网内分布式节点信息发送进行 100 次蒙特卡洛测试。

设初始值如下:
 $dY=[1,1,1,1]$,
 $X=[0.8,0.175,0.3,0.995,0.995,0.995,0.98]$,
 dF 通过迭代采用 dY/dX 的值代替原来的偏微分。
设

$$H=\begin{bmatrix} 0.95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.98 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.95 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.95 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.94 \end{bmatrix}。$$

(16)

采用以上假设,模拟以上不同因素对态势的 4 个指标的影响,实验结果如图 3 和图 4 所示。

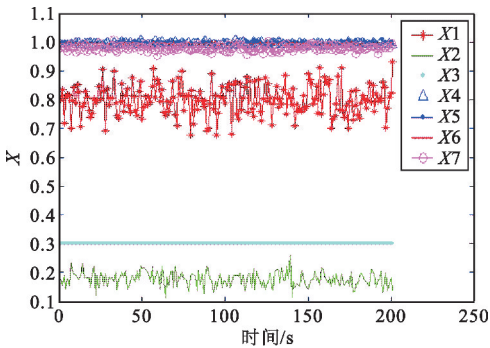


图 3 影响因素 X 变化关系曲线

Fig. 3 The variation range curve influencing factor X

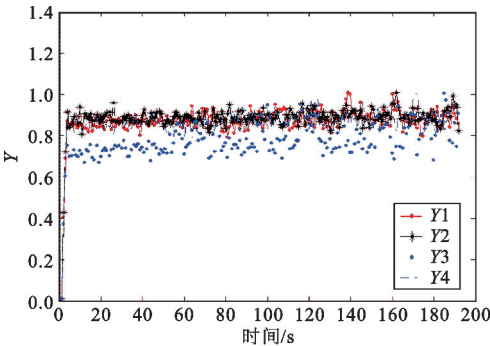


图 4 态势信息变化曲线

Fig. 4 The variation range curve of situation information

图 3 为统计的 200 s 内各个自变量随时间的变化曲线,模拟的是统计意义下的目标情况,与真实场景目标分布不同,未模拟目标的属性信息。图 4 在图 3 中 X 变化的情况下,计算出具体时刻在相应 X 误差情况下态势衡量指标的误差分布情况。可以看出,指标直接的变化呈现非线性关系,每一个指标的

变化都可能影响态势。通过实验,进行其真实值和多次试验情况统计取平均值进行对比,如表 1 所示。

表 1 误差统计表
Table 1 Error statistics

统计量	真实误差变化率 (平均值)	实验误差变化率 (平均值)
dY1	0.055	0.087
dY2	0.005	0.010
dY3	0.065	0.200
dY4	0.027	0.058

表 1 统计了 200 s 内系统建立的误差分布情况,通过图 4 及表 1 的统计,分析了在其影响情况下态势信息的变化情况,可以看出 $Y2$ 态势实时性相对其他几个指标来说,其实时性还是比较高,主要原因是本文中设定的播报周期为 1 s 一次,在实际环境中由于地面目标或空中目标播报频率不一致,该实时性可能会下降,态势完整性相对其他指标由于目标的丢失,其误差比较大;其他两者指标居中。与真实值相比,我们的分析方法误差在可接受范围内,其误差来源一方面由于模型本身的局限性,另一方面由于影响变化的因变量本身是一个统计量,未能反映当前系统的实时情况。本算法对建立定量分析态势信息具有一定的理论和实际意义。

上文通过综合各指标的影响、多因素的线性化分析及误差传递分析,有效地完成了态势信息的衡量和相关指标测试。目标多指标联动体系为数据链战场态势信息形成提供了一种分析思路,为后续战场态势分析及相关应用提供了较为可靠的依据。理论分析和实验证明,战场态势的统一性、完整性等指标的变化与网络状态等之间存在非线性的关系。

4 结束语

本文建立了一种分析分布式数据链战场态势指标与单节点探测能力和网络能力等指标的关系,通过分析这种关系,建立了节点获取态势信息及态势变化因素的误差模型。仿真表明,本文提出的战场态势分析方法在一定程度上可以衡量战场态势的特性,为衡量分布式数据链信息战场态势提供了理论和实际依据。存在的不足是采用间接求取的方法进行计算,同时未能形成直接描述态势的能力。后续

工作将针对战场态势形成原因及马尔科夫过程中态势与具体指标的影响关系进行深入研究。

参考文献:

- [1] 刘邈. 数据链网络测试系统设计[J]. 电讯技术, 2011, 51(6): 25-29.
LIU Miao. Design of a Data Link Network Tested[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(6): 25-29. (in Chinese)
- [2] 任清安, 赵洪立, 刘军伟. 机载雷达探测精度评估方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(1): 29-33.
REN Qing'an, ZHAO Hongli, LIU Junwei. Research on Evaluation Method of Detection Precision of Airborne Radar[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(1): 29-33. (in Chinese)
- [3] 王峰, 李明, 傅有光. 机载 JTIDS 辐射源的时延估计方法研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(6): 47-49.
WANG Feng, LI Ming, FU Youguang. Study on Time delay Estimation of Airborne JTIDS Emitter[J]. Modern Radar, 2008, 30(6): 47-49. (in Chinese)
- [4] 张剑. 符号内连续相位差分相移键控调制方法[J]. 电讯技术, 2010, 50(8): 63-66.
ZHANG Jian. Inner Symbol Continuous Phase Differential Phase Shift Keying Modulation [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(8): 63-66. (in Chinese)
- [5] Hunter T E, Nosratinia A. Coded cooperation under slow fading, fast fading, and power control[C]//Proceedings of 2002 GLOBECOM. Taipei: IEEE, 2002: 77-81.

- [6] Hasib A, Fapojuwo A O. Analysis of common radio resource management scheme for end-to-end QoS support in multiservice heterogeneous wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2426-2439.
- [7] Liu K J R, Sadek A K, Su W F, et al. Cooperative communication and networking[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 123-176.
- [8] Laneman J N, Wornell G W. Distributed Space-time-coded Protocol for Exploiting Cooperative Diversity in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2425.

作者简介:



徐 胜(1969—),男,湖南沅江人,1991年于海军工程学院获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航空通信系统;

XU Sheng was born in Ruanjiang, Hunan Province, in 1969. He received the B. S. degree from Naval Electronic Engineering College in 1991. He is now a senior engineer. His research concerns aviation communication system.

Email: cyy_1999@126.com

崔雨勇(1983—)男,山西襄汾人,2012年获博士学位,现为工程师,主要从事计算机视觉与信息处理方面的研究。

CUI Yuyong was born in Xiangfen, Shanxi Province, in 1983. He received the Ph. D. degree in 2012. He is now an engineer. His research concerns computer vision and information analysis.

Email: 44989183@qq.com