

空间信息支援力量编组模式分析

汤亚锋, 于小红

(装备学院, 北京 101416)

摘要: 在总结美军空间信息支援力量融入指挥机构模式的基础上, 提出了空间信息支援力量的两种编组模式, 即独立编组模式和分散编组模式, 对其内涵和适用范围进行了阐述。基于 Kuramoto 模型, 建立了空间信息支援力量的编组同步能力模型。通过仿真案例分析, 对独立编组、完全分散编组和不完全分散编组模式的同步能力进行了评估。结果表明, 在空间信息支援力量节点间信息共享能力较弱时, 独立编组模式的同步能力最好。结合指挥机构编组实际, 提出了一种在分散编组模式基础上配备一个空间信息主管的新模式, 分析结果表明: 该模式可操作性最强, 且同步能力优于完全分散编组模式。

关键词: 空间信息支援力量; 指挥机构; 编组模式; Kuramoto 模型; 同步能力

中图分类号: E917

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2015.06.003

Analysis of Space Information Support Task Organization Mode

TANG Ya-feng, YU Xiao-hong

(Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: After summarizing US military forces' space information support organization modes in command and control structure, two task organization modes are proposed, i. e., individual task organization mode and distributed task organization mode, and the meaning and applied conditions are discussed. Based on Kuramoto model, a synchronization ability model of space information support task organization is established. A simulation case including individual task organization mode, completed distributed task organization mode and uncompleted distributed task organization mode is run to compare the synchronization ability. The results reveal that the individual task organization mode has the best synchronization ability when space information support nodes without or only with weak connections. Considering practical constraints of command and control structure, a new task organization mode is proposed, which based on completed distributed task organization mode with an enhanced space information chief. The analysis of the new mode shows that it is the most practical mode, and its synchronization ability is better than completed distributed task organization mode.

Key words: space information support organization; command and control structure; task organization mode; Kuramoto model; synchronization ability

空间信息支援力量,是指利用空间信息获取系统、空间信息传输系统以及天基时空基准系统为军事行动提供侦察监视、通信中继、导航定位、授时、气象以及大地测绘等信息支援的力量统称,是空间力量的重要组成部分^[1]。由平台中心战向网络中心战的转变过程中,要求空间信息融入联合作战指挥的程度不断加深,空间信息应用层次逐渐向战役、战术层扩展,空间信息应用人员由高层领导和专业技术人员向低层指挥员及前线作战人员扩展。因此,空间信息支援力量如何在联合作战指挥机构编组,以更好地增强联合部队作战能力,成为一个关键问题。

美军非常重视指挥控制理论的研究,在美国国防部“指挥控制研究计划”(CCRP)统筹下对信息时代基

本的指挥控制理论进行了卓有成效的研究。但从公开文献来看,美军没有从理论的角度对空间信息支援力量的组织结构和运用模式开展专门的研究。海湾战争以来,美军一直是通过实战探索空间信息支援力量的组织结构及运用模式^[2-3]。美国原航天司令部从 20 世纪 90 年代中期开始成立空间支援小组,各军种成立的空间支援小组服务于战区指挥官以及联合特遣部队,使得作战人员能够理解并运用空间能力。1995 年,美空军组建了第 76 空间作战中队,协助联合部队空中分部指挥官应用空间能力,支持空中作战。美空军的空间支援小组先后参与了“沙漠之狐”、“盟军部队”等行动。进入 21 世纪之后,由于培养了大量的空间人员,美空军废除了空间支援小组这种模式,将空间人员分布到指挥机构的各个部门,并设立空间部队主管一职,负责统一协调战区空间需求和空间作战效果。而美国陆军仍然通过空间支援小组(SST)或空间支援分队(SSE)将空间能力集成到部队。空间支援小组是一个可派驻的小组,由 6 个作战人员组成;而空间支援分队

收稿日期: 2015-07-28

修回日期: 2015-09-07

作者简介: 汤亚锋(1982-),男,湖南宁乡人,硕士,讲师,研究方向为军事航天技术。

于小红(1965-),女,教授。

规模更小,通常只有2-3人,部署在旅部或者某个分指挥部。战区陆军的指挥机关将空间信息支援力量部署在移动与机动小组(Movement and Maneuver cell,隶属于G-3)之下,其中,主指挥所包括1名高级空间作战军官和2名空间作战与计划军官,应急指挥所指包括1名空间作战军官^[4]。美海军以及陆战队只有少量人员具备空间作战的技能,而且都未形成服务战斗的空间小组。不过,美国海军正在对其指挥体系进行变革,就像空军设立空天作战中心一样,在海上指挥部也设置海上作战中心,使编号舰队总部也具有成为联合特遣部队总部核心的能力。有关空间作战将通过联合部队海军分部的海上作战中心来实施。海上作战中心将成立空间支援工作组(SSWG),由空间支援工作组向所有作战区域、规划小组及决策讨论提供空间系统和服务支持^[5]。而在联合层面,美联合战役司令部还没有成立专门的空间信息支援组织,但2013版联合空间作战条令表明未来可能在指挥机关设立联合空间分队,用于综合和协调战区职能司令部、军种司令部等不同机构中的空间信息支援力量。

我军空间信息支援力量的建设与运用还处在快速发展之中。从理论的角度分析空间信息支援力量不同编组模式的效果,可为我联合作战指挥体系的建立提供依据,为空间信息支援力量建设提供指导。

1 编组模式分析

空间信息支援力量的编组模式可分为独立编组模式和分散编组模式两类,前者又可以划分为独立部门式和独立部位式,后者按照分散程度不同可能存在多种形式。

1.1 独立编组模式

独立编组,即将所有空间信息支援力量编组在一个独立的组织内。存在独立部门式和独立部位式两种可能方式。

独立部门式,是指在指挥机构内部成立一个单独成体系的职能(或军种)部门,完成归口各类任务。当联合作战指挥机构按照军种划分部门时,即在原陆军部门、海军部门、空军部门的基础上,增加独立的空间部门(涵盖空间信息支援力量);当按照职能划分部门时,在原有的指控部门、情报部门、通信部门等部门的基础上,设置平行的一个空间信息支援部门。

独立部位式,是指在指挥机构负责作战的部门(如指控中心)增加一个独立的部位,负责空间信息支援作战任务。此时,空间信息支援编组与综合计划、火力打击等核心作战编组地位对等,通过彼此协调,在统一指挥下,对作战行动全过程实施空间信息支援。

采取何种方式独立编组,与力量的使命任务和具备的能力紧密相关。如美陆军的空间支援分队就是典型的独立部位式,即空间支援分队是作战部门(G3)下属的独立的编组。而美军最初成立空间司令部时,是将空间力量作为独立的作战力量看待的;不过,随着空间司令部并入战略司令部,空间力量的地位得到了更加切合实际的界定。即目前从联合部队层面来看,美军空间力量的编组比独立部门式较弱,是按照空天一体的模式(空中力量和空间力量合二为一)进行的独立部门式编组。

1.2 分散编组模式

分散编组,即在不改变现有指挥体系的组织结构的情况下,将空间信息支援人员融入指挥机构各个部门。比如,在情报部门增加席位,负责空间侦察监视信息的处理;在通信部门增加席位,负责卫星通信中继;在指挥控制中心的测绘气象部位编入负责卫星导航定位、授时、气象以及大地测绘的人员。这些人员战时各司其职,并接受上级业务部门的指导。

该方式尊重现有体制编制,但是空间信息支援力量相对分散,难以形成整体合力。随着战争节奏加快,对空间信息融合一体使用的要求增加,必然要求不同组织内的空间信息支援人员建立更加紧密的联系和协同。改善协同能力的根本途径在于建立信息共享通道。因此,可在空间信息支援人员之间建立信息共享通道,促进空间信息支援力量的一体化运用。

因此,按照空间信息支援人员之间有无信息共享通道,可分为完全分散编组方式和不完全分散编组方式。事实上,当空间信息支援人员之间建立全联通信信息共享网络时,协同能力最佳。此时,这种空间信息支援力量的编组可称为边缘性组织^[6]。

2 编组同步能力模型

空间信息支援力量的编组效果如何,主要体现在协同完成空间信息支援任务的能力上。只要组织形式能确保空间信息支援能力的整体发挥,并确保与其他任务的同步,就认为该组织形式是合适的。

关于组织协同能力的描述,国内外学者主要集中在研究复杂网络同步能力上,通过研究不同网络拓扑结构、分析不同网络参数对同步性能的影响,为指控组织的设计和评估提供依据^[7]。而日本科学家藏本由纪提出了Kuramoto模型,用于描述大量耦合振子行为,特别适合描述同步行为,其应用已扩展到多个学科。该模型具有描述简单、便于理解的特点,适合描述抽象的组织间信息扩散以及自同步过程。国外一些学者引入了该模型来描述指控组织^[8-10]。国内的王欣等人也利

用该模型分析了网络中心战的作战节点同步能力^[11]。本文利用该模型对不同空间信息支援力量编组模式进行分析。

2.1 Kuramoto 模型

N 维 Kuramoto 模型的数学描述为

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i), i = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中, θ_i 表示振子 i 的相位, ω_i 表示振子 i 的固有频率, 且满足概率密度为 $g(\omega)$ 的分布, K 表示耦合强度。当没有耦合 ($K = 0$) 时, 振子以自然频率运动, 当引入耦合后, 振子间会出现相同步, 振子间保持稳定的相位差。

式 (1) 可改写为

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i), i = 1, \dots, N \quad (2)$$

此时 K_{ij} 为耦合矩阵, 更便于描述不同振子间耦合程度不同的情形。公式 (1) 是最简单的一种形式, 描述的是平均场耦合 (mean-field coupling) 情形, 即 $K_{ij} = K/N > 0$ 。该式还可写为如下形式:

$$re^{i\psi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} \quad (3)$$

其中, 序参量 $r(t) \in [0, 1]$ 反应振子间的相关性, $\psi(t)$ 为平均相位。

2.2 同步能力度量模型

为了对编组的效果进行分析, 必须设立衡量整个系统同步完成任务的能力标准。从 3 个层面衡量同步效果。首先, 对编组内部各个节点之间的同步能力进行衡量; 其次, 对不同编组之间的同步能力进行衡量 (即整个系统); 最后, 对空间信息支援力量节点之间的同步能力进行衡量。

1) 编组内部同步能力

单个节点的自然频率为 ω_i , 即节点 OODA 环的周期为 $2\pi/\omega_i$, 各节点完成 OODA 环的周期可能并不相同, 但是, 在完成作战任务时, 各节点必须趋同, 才能保证战斗节奏一致。利用 Kuramoto 模型, 其同步能力就用两个参数来衡量: 一是序参量的大小, 二是达到稳定同步所需的时间。

由 N 个节点组成的编组, 其序参量由下式计算:

$$r(t) = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} \right| = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N \cos\theta_j(t) \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N \sin\theta_j(t) \right)^2} \quad (4)$$

$r(t)$ 越大, 则 t 时刻各节点相位越一致, 所处的 OODA 阶段越接近, 同步效果越好; 反之亦反。当 $r(t)$ 为 1 时, 说明各节点完全同步, 效果最好。

$r(t)$ 是随时间动态变化的, 经过一段时间可能趋于稳定, 也可能发散。为了衡量稳定状态, 给出如下定义:

定义 1: 对于同一编组的序参量 $r(t)$, 如果当 $t > T_\varepsilon$ 时, 能够找到一个较小的常数 ε , 使得对任意的 $\Delta t > 0$, 都满足 $|r(t + \Delta t) - r(t)| \leq \varepsilon$, 则认为该编组在时间 T_ε 之后达到稳定的同步状态。

定义 2: 使编组达到稳定同步所需的最小时间 $T_{\varepsilon-\min}$ 称为同步稳定时间。

因此, 编组各节点达到稳定的时间越短、稳定后序参量越大, 则编组同步能力越好, 且用下式量化计算:

$$M_s = r_s \cdot \beta^{T_{\varepsilon-\min}} \quad (5)$$

其中, M_s 表示该编组的同步能力, r_s 是达到稳定状态后序参量的均值, $\beta \in (0, 1)$ 是调节因子。当对达到同步的时间要求越严格时 (OODA 周期小), β 取值越小, 反之 β 取值越大。

当节点不能达到稳定状态时, 又可分为两种情况: 一种情况是节点以一定的振荡周期运行, 此时节点仍能确保任务的完成; 另一种是节点状态呈发散趋势, 难以保证任务的完成。因此, 使用下式来计算这两种情形下编组的同步能力:

$$M_u = \begin{cases} [r_u - (r_{\max} - r_{\min})] \cdot \gamma^{1/T_c}, & r_u - (r_{\max} - r_{\min}) > 0 \\ 0, & r_u - (r_{\max} - r_{\min}) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, r_u 为进入振荡后序参量的均值, r_{\max} 、 r_{\min} 分别为振荡的上限和下限; T_c 是最小振荡周期, γ 为振荡周期作用因子。当振荡周期对同步能力影响越大时, γ 取值越大。

2) 编组间同步能力衡量

所有编组组合在一起, 共同完成一个任务, 因此, 各编组之间也必须具有较好的同步能力。使用下式计算由所有编组组成的整个系统的同步能力:

$$M = \left(\sum_{i=1}^P w_i M_i \right) \cdot \left(1 - \frac{\Delta\psi}{\psi_e} \right) \quad (7)$$

其中, P 是编组的数量, M_i 是第 i 个编组的同步能力, w_i 是编组在整个系统中的权重, ψ_e 是各编组平均相位的均值, $\Delta\psi$ 是各编组平均相位的标准差。因此, 各编组内部同步能力越好, 且编组之间 OODA 环频率越一致, 则整个系统的同步能力越好。

3) 空间信息支援力量的同步能力

当空间信息支援人员独立编组时, 其同步能力由前述的公式 (5) 和 (6) 计算; 当空间信息支援人员分散编入各个编组时, 将这些节点组成虚拟编组, 同样由这两个公式计算。

3 案例分析

假设某指挥机构内部有 4 个编组,每个编组包括 5 个节点(其中 1 个节点为指挥节点)。另外,将上级指挥官作为一个独立的编组,且只包含一个节点。假设在指挥机关增加 4 名空间信息支援人员。当以独立编组模式编组时,指定 1 名空间信息支援人员为指挥官,其指挥关系与其他编组一致;当分散编组时,空间信息支援力量节点的关系与所在编组其他节点指挥关系一致。其中,完全分散编组模式时,各空间信息支援力量节点之间无信息共享通道;不完全分散编组时,在各空间信息支援力量节点之间建立一条信息共享通道。各编组模式及其拓扑结构如图 1 所示。

对如上 3 种模式,作如下假设:

- 1) 节点间的连接关系表示信息交互关系,双向作用,强度一致。用数值表示连接强度,数字越大,表明对信息交互的要求越高,连接强度越大。
- 2) 假设编组内部节点间连接强度一样,但空间信息支援力量的连接强度要大(因为对信息交互要求更高)。编组间的节点连接强度比编组内节点的连接强度小。
- 3) 自然频率表示 OODA 周期的大小,自然频率越大,则 OODA 周期越短,即决策越快。假定指挥员的 OODA 周期比下级参谋长,上级指挥员的 OODA 周期比下级指挥员长。
- 4) 编组内节点的初始相位差为 $\pi/2$,且编号最小者为 0,随编号增大而增大。

基于如上假设,设置初始参数如表 1 所示。

表 1 初始参数设置

节点号	1	2	3	4	5	6	7
自然频率	2	3	3	4	4	2	3
初始相位	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
节点号	8	9	10	11	12	13	14
自然频率	3	4	4	2	3	3	4
初始相位	π	$\frac{3\pi}{2}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$
节点号	15	16	17	18	19	20	21
自然频率	4	2	3	3	4	4	2
初始相位	0	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	0	0
节点号	22	23	24	25			
自然频率	2	3	4	1			
初始相位	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	0			

此外,设空间信息支援力量节点的连接强度为 2,

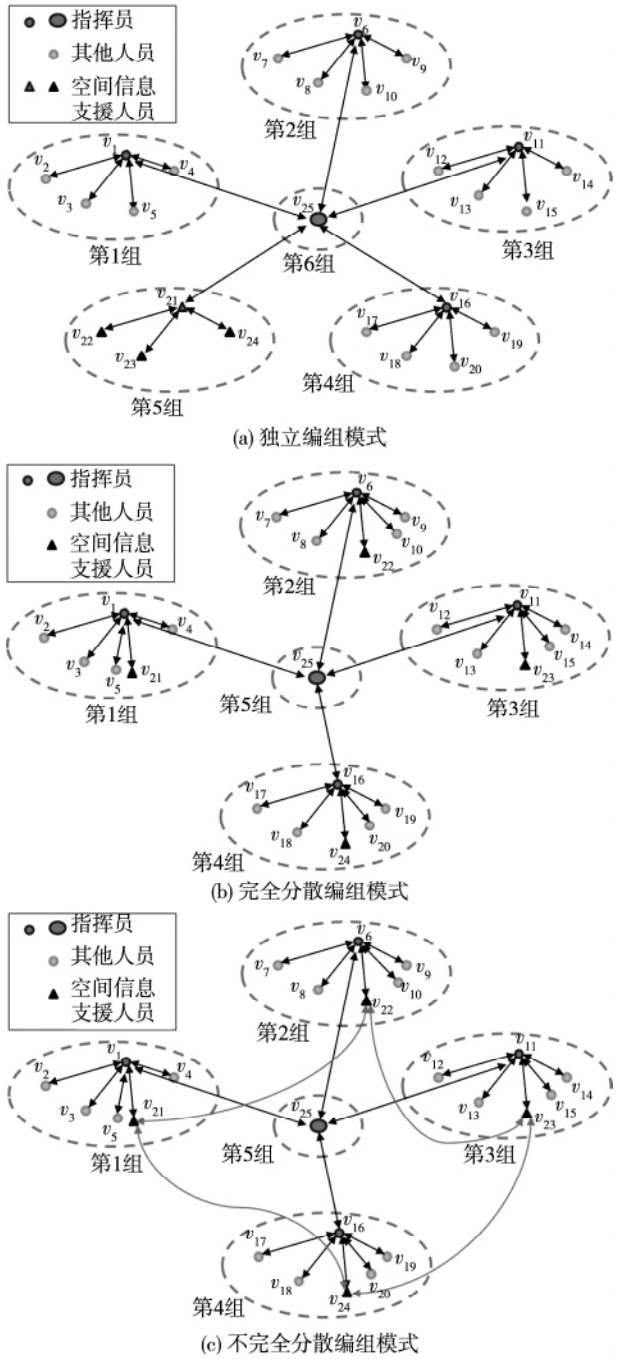


图 1 三种编组模式示意图

其他编组内节点的连接强度为 1,编组间连接强度为 0.5。不完全分散编组中,不同编组间空间信息支援力量之间的连接强度设为 1。同时,设 ε 为 0.05, β 为 0.9。

经计算,可得到 3 种模式下的同步稳定性情况如图 2 所示。

由图 2 可知,独立编组模式下,各编组能够达到稳定同步。完全分散编组模式下,虽然第 1-4 组组成完全一样,但空间信息支援力量的频率不一样、初始相位不一样,使得各个编组的表现不完全相同。从序参量

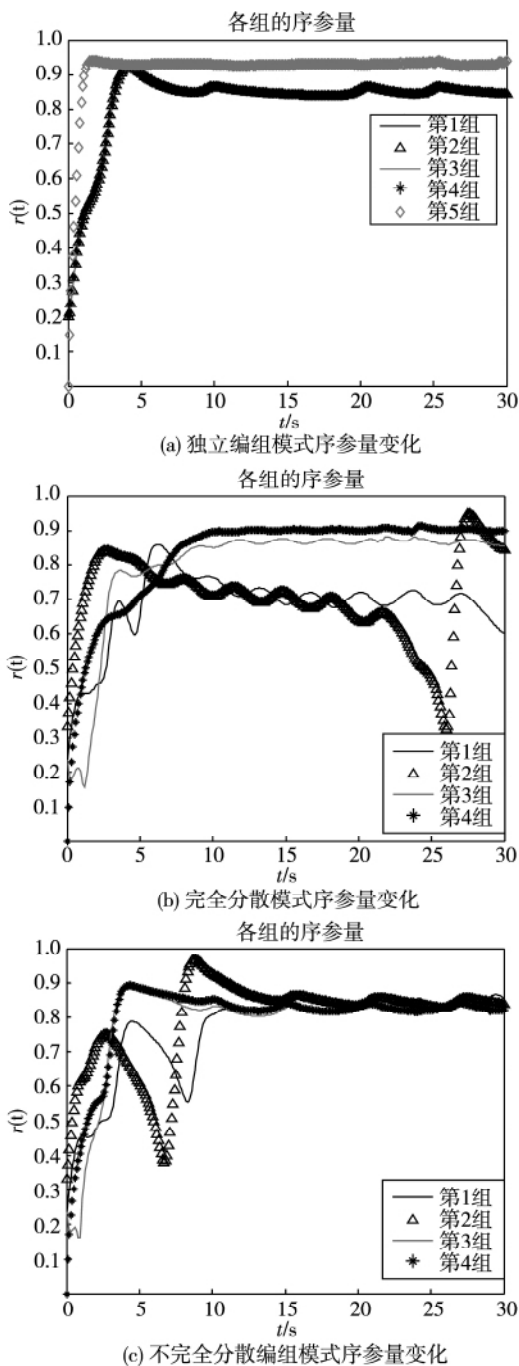


图 2 三种模式下的同步稳定性

变化曲线可以看出,第 1 组和第 2 组未能稳定,具有短周期振荡、长周期衰减然后再跃变的特征;而第 3 组和第 4 组能够趋于稳定。不完全分散编组模式下,各个编组都能达到同步稳定状态,说明编组间增加信息链路起到了调节效果。

计算得到不同编组模式下系统整体同步能力如表 2 所示。

表 2 三种模式的系统整体同步能力

编组模式	独立	完全分散	不完全分散
同步能力	0.6280	0.2176	0.4217

因此,独立编组模式的系统同步能力最好,不完全分散编组模式次之,完全分散编组模式最差。表明将性质相近的节点进行编组是必要的。而不完全分散编组模式的协同能力因为增加信息链路而改善,因此,要提高各编组乃至整个系统的同步能力,可增加节点的连接关系,提高节点的连接强度。

仅就空间信息支援力量而言,不同模式下,各节点的同步稳定情况如图 3 所示。

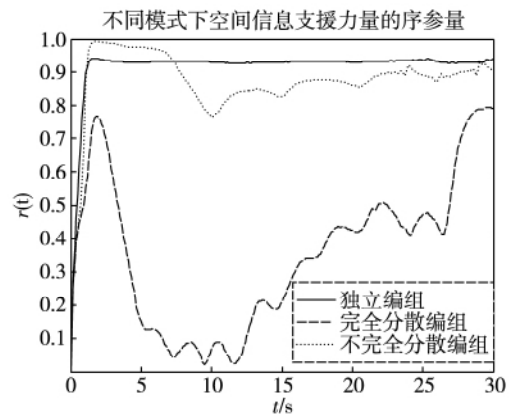


图 3 三种模式的空间信息支援力量同步效果

从图 3 可以看出,3 种模式下,独立编组模式的空间信息支援力量节点间同步效果最好,分散编组模式下,在空间信息支援力量节点间建立链路,也能达到同步协同的效果。有关研究表明,当增加节点间链路数量、提高链路质量时,同步效果将得到提升^[11],全联通网络(边缘型组织)将具有最好的同步能力。

4 新编组模式的探讨

从前面的分析可知,独立编组的同步能力最好,但是在指挥机构中新成立一个部门往往牵扯面较广,组织成本较高;分散编组的同步能力能通过建立信息共享通道而改善,但是建立横向信息共享通道需要对现有指挥信息系统进行升级改造,也非一朝一夕之功。因此,可以综合二者之长,规避二者之短,采用一种新的编组模式(图 4)。该编组是在完全分散编组模式的基础上,为指挥机构的指挥官增加一名空间信息支援副手(暂称之为空间信息主管),专门负责空间信息支援任务,对上为指挥官提供空间信息支援任务的决策建议,对下统辖分布在各部门的空间信息支援人员。即分布在各部门的空间信息支援人员受双重领导,在空间信息支援任务上接受该名主管的指导,在其他方面仍然受本部门领导的指挥。

设空间信息主管节点的自然频率为 1.5,初始相位为 $\pi/2$,与下级空间信息支援人员的连接强度为 1,与

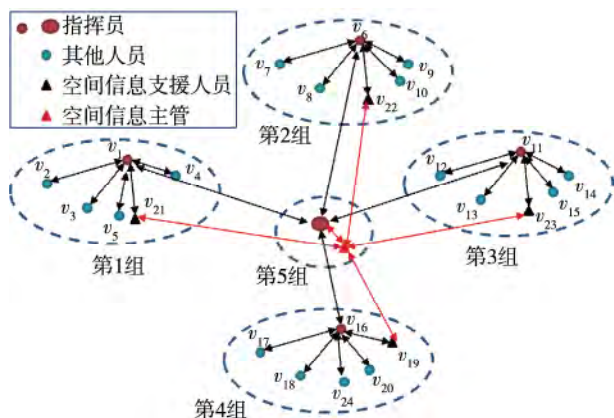


图4 新的编组模式

指挥官的连接强度为1,则按照前述步骤计算其同步效果,结果如图5所示。

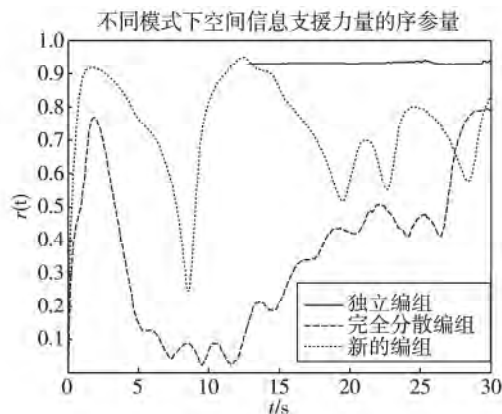


图5 新编组模式与集中、完全分散编组模式同步效果之比

图5对比了集中编组模式、完全分散编组模式以及新编组模式下空间信息支援力量的同步效果。从图中可以看出,新编组模式的同步效果优于完全分散编组模式,但逊于集中编组模式。另外,算得新模式下系统的整体同步能力为0.2457,也比完全分散模式略好。因此,这种新的编组模式既可避免独立编组、不完全分散编组的缺点,又可获得比完全分散编组更好的空间信息支援同步能力,可成为现阶段具有可操作性的一种编组模式。

5 结束语

空间信息支援力量是将空间能力集成到联合部队的具体执行者,其完成任务的能力直接制约着空间信息支援能力的发挥。因此,在指挥机构内对其科学编组是构建科学的联合作战指挥体系关键的一环。本文在

分析美军空间信息支援力量编组模式的基础上,提出了独立编组和分散编组两种模式,对其内涵和适用条件进行了阐述。利用Kuramoto模型,建立了编组同步能力模型,并结合实例,对独立编组、完全分散编组和不完全分散编组模式进行了仿真分析,结果表明,独立编组模式的同步能力最好,分散编组模式的同步能力随横向信息共享能力改善而改善。结合指挥机构编组实际,提出了一种在分散编组模式上增加一名空间信息主管的新编组模式,分析结果表明,该编组模式在耗费较小代价的同时,有效地提高了空间信息支援力量之间的同步能力。

参考文献:

- [1] 刘震鑫,于小红,关冰兵. 着眼战斗力生成模式转变加快空间信息支援力量建设[J]. 装备学院学报, 2012, 23(3): 64-68.
- [2] Eric N. Strom. Space Support For The Warfighter: Determining The Best Way To Provide Space Capabilities At The Army Division And Brigade Levels [D]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2009.
- [3] David N. Spires. Beyond Horizons—A History of the Air Force in Space, 1947-2007, 2nd Edition [M]. Peterson Air Force Base, Colorado: United States Air Force Space Command, 2007.
- [4] FM 3-93, Theater Army Operations. Washington DC: Headquarters Department of the Army, 2011.
- [5] JP 3-44, Joint Doctrine for Space Operations [M]. 2013.
- [6] SAS-065. NATO NEC Command and Control Maturity Model [R]. Washington D. C.: CCRP, 2010.
- [7] 卜先锦. 军事组织协同的建模与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [8] Alexander Kalloniatis. A New Paradigm for Dynamical Modelling of Networked C2 Processes [C]. Seattle, WA: 13TH ICCRTS, 2008.
- [9] Anthony H. Dekker. Analyzing C2 Structures and Self-Synchronization with Simple Computational Models [C]. Quebec City, Canada: 16th ICCRTS, 2011.
- [10] Alexander Kalloniatis, Mathew Zuparic. The J-Staff System, Network Synchronisation and Noise [C]. Alexandria, VA: 19th ICCRTS, 2014.
- [11] 王欣,姚佩阳,周翔翔,等. 基于任务的网络中心战作战同步能力度量[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(1): 96-101.