

基于载波动态调整的 FDMA 系统 优化关键技术研究

樊丁赫¹, 倪永婧²

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050000;

2. 河北科技大学 信息科学与工程学院, 石家庄 050000)

摘要: 目前, 基于频分复用体制的卫星通信系统在数据传输过程中带宽资源调整受限, 灵活性较差; 在当前 FDMA 通信系统的框架之下设计出新的调制解调模块架构; 对载波变化的工作流程进行了规划; 根据需要设计出适合新系统的数据帧结构并验证了其可靠性; 采用了通信测距技术, 对全网时间同步进行了分析计算, 并验证了测距的稳定性; 经实际工程环境搭建验证, 初步实现了载波动态调整。

关键词: 频分复用; 卫星通信; 载波动态调整

Research on Key Technology of FDMA System Optimization Based on Carrier Dynamic Adjustment

Fan Dinghe¹, Ni Yongjing²

(1. 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050000, China; 2. College of Information Science and

Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: At present, the satellite communication system based on Frequency Division Multiple Access has disadvantages of limited bandwidth adjustment and poor flexibility in data transmission. A new modem module architecture is designed under the framework of current FDMA communication system. The workflow of carrier adjustment is planned. According to the needs, the data ton structure suitable for the new system is designed and its reliability is verified. Communication ranging technology is adopted to analyze and calculate the time synchronization of the whole network, and the stability of ranging is verified. The carrier dynamic adjustment is preliminarily realized through the construction verification of the actual engineering environment.

Keywords: FDMA (frequency division multiple access); satellite communications; carrier dynamic adjustment

0 引言

卫星通信网络作为天地一体化网络的骨干部分, 是以卫星为主要载体进行信息获取、传输和处理的网络系统^[1]。处于不同轨道和不同类型的卫星通过星际链路互连, 构成覆盖全球的空间信息网络, 再通过星地链路与地面设施所组成的通信网络进行互连互通, 有效地获取和传输多维信息, 并且负责完成资源的统筹处理、任务的分发和管理等一系列任务。随着宽带卫星通信系统的快速发展, 更高质量的业务需求对宽带通信系统的通信链路传输技术提出了更高的要求, 如何高效地利用带宽、有效地传输数据成为选择通信链路传输技术的重要标准。

目前在卫星通信的体制中, 使用最多的是频分复用 (FDMA) 和时分复用 (time division multiple access, TDMA) 两种^[2]。基于 FDMA 体制的卫星通信系统尽管具有

性能稳定, 通信可靠性能高, 编码方式多样等优点, 但是相对 TDMA 而言, 由于其频分复用的特点, 在带宽资源分配后, 数据的传输过程中带宽大小不变, 频点位置不变, 从而占用固定的带宽资源。因此带宽利用率相对较低, 灵活性较差。传统的 TDMA 系统在已有的成熟体制下结合 FDMA 系统优点进行了优化拓展, 逐步研制出多频时分复用系统 (multiple frequency time division multiple access, MF-TDMA), 使之在帧效率和性能稳定性上有所提高。随着 IP 技术在卫星通信中的应用, 每一个远端站终端业务类型已经不仅仅局限于一路语音视频, 可能包含多个 IP 数据业务同时接入。因此, 业务数据量变化与信道变化会更加频繁, 而 FDMA 系统在按需分配带宽时往往是基于最大需求的情况, 这样导致系统在数据传输过程中对分配的带宽资源往往不能充分利用, 对带宽资源的使用效率偏低, 而数据传输过程中对带宽进行硬切换又会出现丢包现象, 不能从根本上解决带宽利用率低的问题。因此, 需要针对 FDMA 系统传输中对数据量变化进行适应性载波动态调整的关键技术研究, 以提高 FDMA 系统的带宽使用效率。

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-06-27。

作者简介: 樊丁赫(1993-), 男, 河北衡水人, 在读硕士研究生, 主要从事卫星通信领域方向的研究。

通讯作者: 倪永婧(1981-), 在读博士, 讲师, 主要从事计算机网络与信号处理等方向的研究。

1 系统结构及原理

FDMA/DAMA 体制的卫星通信系统大多针对某些卫星专网应用, 由于其性能稳定, 传输数据量大的特点被广泛应用于应急卫星通信中^[3]。在实际应用中, 可能需要按照用户要求, 随时建立两个结点之间的链路, 实现两个地球站之间的网络互通。FDMA/DAMA 系统主要由中心站 (Center Station, CS)、卫星转发器、若干远端站 (Remote Station, RS) 组成^[4]。远端站包括业务调制解调器、网控调制解调器、路由器、接入控制设备及业务终端等通信设备, 中心站除包含上述设备外还包括网管系统。系统结构如图 1 所示。

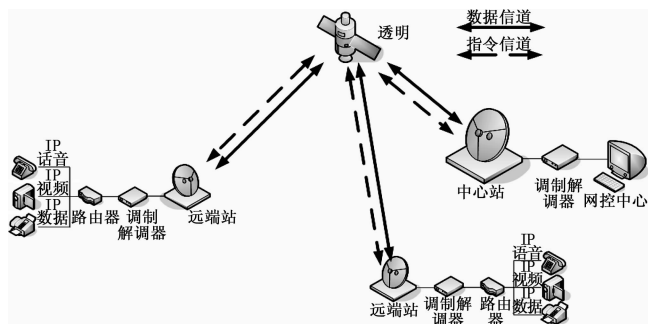


图 1 FDMA 卫星通信系统组成

在该卫星系统中, 信息收发的调制解调器均采用双发双收的形式, 一路用于传输指令信息, 另一路用于传输业务信息。其中, 中心站位于网络的逻辑中心, 在特定的 TDM 指令信道内通过 TDM 广播的形式对整个网络中远端站进行带宽资源分配、链路建立、链路拆除等控制, 并且中心站能够和网络中全部的远端站直接通信^[5]。所有远端站通过 Aloha 上行信道在固定的带宽下分时隙地发送建链请求、接收信息反馈、数据流量监测、链路释放请求等信息, 从而动态建立两个地球站之间的连接。各地球站之间通信, 地球站与中心站之间通信均采用 FDMA 频分复用的形式占用固定信道, 一旦有业务需要传输即通过远端站上传资源申请, 中心站收到后进行资源分配并下发分配信息, 远端站收到分配信息后自动配置收发参数, 发送测试数据进行建链, 两端收发同步后将确认信息上传中心站并开始连续发送数据信息。从而动态建立两个地球站之间的连接^[6]。

2 系统整体设计方案

该系统结构设计方案是在原有 FDMA 系统调制解调架构上加入信息交互以及时间控制模块, 使整个系统在一个时间基准下进行规律变化, 以保证各远端站在载波变化时没有相互影响。在入网操作时, 各远端站通过指令信道与中心站进行时间信息交互, 利用测距技术进行同步并保持。在通信过程中, 各远端站将流量监测数据及状态通过指令信道发送给中心站进行数据分析, 中心站给各远端站下发配置参数。各远端站的调制端与解调端在时间控制模

块下进行数据处理通信操作。系统处理模块如图 2 所示。

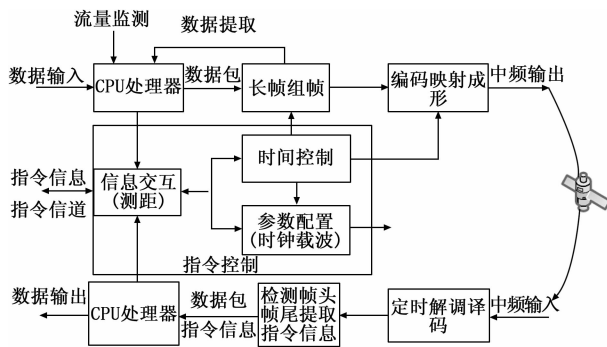


图 2 系统结构设计方案

在数据信道调制解调中, CPU 处理器模块和组帧模块之间加入了交互功能, 在数据帧需要数据信息的时候, 组帧模块给 CPU 处理器一个使能信号, CPU 处理器在使能信号内将数据包发送给组帧模块进行组帧, 同时 CPU 处理器模块具备缓存功能, 当数据输入量增大而传输速率来不及变化时, CPU 将数据缓存下来并将缓存信息通过信息交互模块及时上报中心站, 在下一个载波变换周期中增大载波速率以提高传输能力, 缓存的数据量设定在门限值以下, 防止数据量过大产生丢包。在指令控制系统中, 信息交互模块接收中心站通过 TDM 广播信道下发的测距信息和参数配置信息并分别发送给时间控制模块和参数配置模块。时间控制和参数配置模块分别进行时间参数和载波参数的校正与配置同时生成反馈信息并发送给信息交互模块中, 信息交互模块通过将反馈信息和 CPU 状态信息组帧通过 Aloha 上行信道发送给中心站, 完成一个指令信息的交互。

该系统工作流程方案按照各远端站发送数据帧的帧头到达卫星转发器的时间为基准, 保证各远端站发送每一帧的数据帧的帧头到达卫星转发器的时间相同。首先中心站按载波调整周期通过指令信道下发配置参数, 各远端站接收到参数配置后, 按照测距结果进行不同的时延处理后发送数据, 使得每个远端站发送的数据帧头到达卫星转发器的时间相同, 解调端根据指令信道接收的数据以及前帧参数确定接收的参数并进行相应的解调。在指令信息控制下小站一和小站二的数据信道的发送和接收数据的时序图如图 3 所示。

图中, 传输时刻 τ_0 为中心站到卫星转发器的时间距离; τ_1 为小站一到中心站的时间距离; τ_2 为小站二到中心站的时间距离; $\Delta\tau$ 为小站一到小站二的时间距离差 $\tau_1 - \tau_2$; τ_{10} 为小站一到卫星转发器的距离; τ_{20} 为小站二到卫星转发器的距离; τ_{12} 与 τ_{21} 为小站一到小站二的距离。该载波变换流程共分为指令信道、执行指令和数据信道 3 层时刻。首先, 中心站下发参数指令为当前载波变换周期的开始, 分别经过 τ_1 和 τ_2 时间到达小站一和小站二 (小站一距离较远, $\tau_1 > \tau_2$), 小站一接收到参数信息后经过 0.5 s 后配置参数并开始

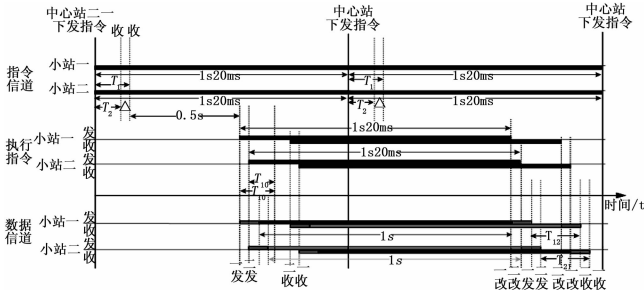


图 3 系统工作流程示意图

发送同步信息与数据信息，小站二再经过 $\Delta\tau$ 后开始配置参数并发送同步信息和数据信息。这样经过 τ_{10} 时间小站一与小站二发送的数据同时到达卫星转发器，并且以后每次进行载波变化时都能保证载波变换的同步性。在数据信道中，小站一和小站二每次配置参数后先发送特定保护时间的同步码再发送数据帧，使得每次载波变换后在解调端先利用同步码进行定时载波的恢复，防止有用信息的丢失。解调端再分别经历 τ_{12} 和 τ_{21} 后进行解调参数的配置，并接收新载波的数据。每次变化过程中，中心站下发指令与小站执行指令和发送数据均是在特定的时间周期中进行。在该载波变换模式下，数据传输过程中按上述工作流程进行周期性变化传输。

3 数据帧结构设计

首先，为了适应周期性变化的特点，数据帧需要设计成固定时长的时帧，即不管载波速率多大，每一帧的帧长在时间上是固定的。结合 QoS 服务质量和存储量的限制以及传输效率，我们将时帧的帧长设置为 1 s 20 ms，其中，包含 IP 数据的数据帧时长为 1 s，用于每次载波同步的同步码时长为 20 ms。其中，数据帧部分包括 96 比特帧头，96 比特帧尾以及若干数据编码块（不同速率对应不同数量的编码块，速率越大，编码块越多）。帧头中包括 32 比特帧头独特字和本帧数据参数，帧尾为 32 比特帧尾独特字和下帧数据参数。同步码时长设计为 20 ms，根据载波速率最低设置为 64 kbps，20 ms 内的同步码数为 1 280 个，满足同步需求。系统数据帧结构如图 4 所示。

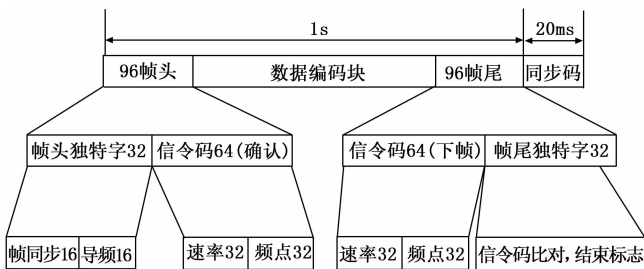


图 4 数据帧结构示意图

由于时长固定，帧头帧尾的字段格式固定，所以不同速率对应每帧中的数据量不同，帧效率也存在差异。对应

不同速率的帧效率如图 5 所示。从中我们可以发现，符号速率越大，帧效率越高，最高效率接近于 98%，远大于 TDMA 帧效率。但是，当速率较低时，帧效率较低，所以我们根据普遍需求，将载波速率设置为 64 kbps~8 Mbps，步进为 32 kbps，这样在载波速率为 64 kbps 时最低效率为 97.75%。帧效率值仍然较高，满足工程需要。

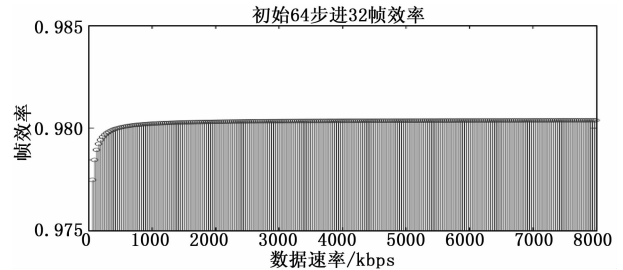


图 5 不同速率下帧效率

4 全网时间同步

在上述分析中我们知道，基于载波动态切换的 FDMA 系统同步变换的前提是使得每一个远端站在一个时间基准下同步变化以保证变换后到达卫星转发器的时间相同而不产生相互干扰。由于各地远端站距离卫星转发器的距离各不相同，所以信息在信道上的传输时延也各不相同，各地球站的本地时间也会存在差异。因此在入网时必须进行全网时间同步，即在有效的误差范围内计算出各小站接收发送指令和数据时的时间，从而能够使所有的远端站在规定的周期时间内接收和发送指令和数据信息并进行载波参数的调整。全网时间同步过程的核心思想是保证不同远端站在初始发送信息和变换载波后发送信息的帧头同步到达卫星转发器。其主要原理是测距原理，即根据小站入网时和数据传输时指令信息的传输时延判断各远端站位置，从而计算出不同位置的远端站在载波变换周期内发送数据的时间。远端站距离与时延示意图如图 6 所示。

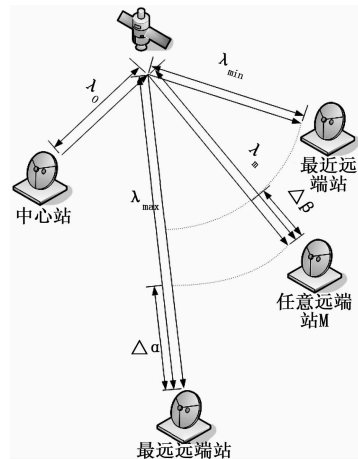


图 6 远端站距离与时延示意图

首先，我们对传输时延进行估计。根据已知静止轨道

卫星的最大倾斜距离 $d_{\max} = 41\ 127\ \text{km}$, 从而得出从地球站到卫星的最大往返时延为:

$$\tau_{\max} = 2d_{\max}/c = 0.274\ \text{s} \quad (1)$$

式中, 光速 c 为 $299\ 792.5\ \text{km/s}$ 。

测距流程包括初测距和精测距两部分。初测距即为根据中心站记录的远端站的经纬度信息由公式大致计算出远端站位置。精测距即通过信号往返时间精确计算远端站距离, 此结果为标准距离。

初测距过程中我们根据卫星转发器的与地球站的位置关系根据公式估计出地球站的大致位置, 从而为精测距提供大致的位置的参数信息。

地球站距卫星转发器的时间距离 λ' 为:

$$\lambda' = R_n/C \quad (2)$$

地球站距卫星转发器的距离 R_n 为:

$$R_n = \sqrt{h_s^2 + r_e^2 - 2r_e \times h_s \times (\cos\theta\cos\varphi\cos\xi + \sin\theta\sin\xi)} \quad (3)$$

式中, h_s 为卫星到地心的距离; r_e 为地球站到地心的距离; θ 为地球站纬度; ξ 为地球站经度; φ 为卫星经度 φ_s 与地球站经度 φ_n 之差。

精测距过程中通过对接后的指令信道各站收发的指令间隙计算各站距离卫星转发器的时间, 测距流程图如图 7 所示。

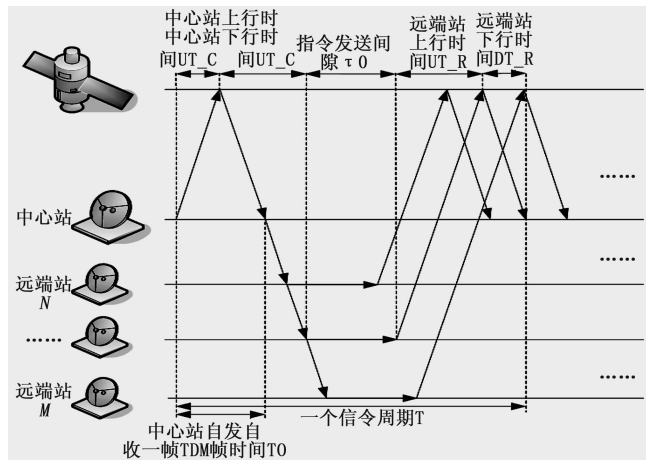


图 7 测距流程图

从图 7 中我们可以知道, 中心站发送一帧 TDM 指令帧后, 经过卫星转发器下发到各个地球站, 不同位置的地球站经过不同的时间延时接收到指令帧。距离卫星转发器近的地球站会先接收到 TDM 指令帧, 距离地球站远的会经过一段时间的延时再接收到指令帧, 中心站自发自收 TDM 指令帧 (时间不一定最短)。各远端站接收到指令帧后, 记录收发时间与帧内数据并组成 ALOHA 反馈帧, 在规定的反馈时限内发送回中心站, 再次经过卫星转发器后到达中心站, 此为一个测距指令帧收发周期。

则上述周期有如下关系:

中心站上行时间与远端站下行时间相等, 即:

$$UT_C = DT_R_n \quad (4)$$

中心站下行时间与远端站上行时间相等, 即:

$$DT_C_n = UT_R_n \quad (5)$$

中心站自发自收一帧 TDM 帧时间为 T_0 :

$$T_0 = 2UT_C = t_s - t_0 \quad (6)$$

中心站到卫星转发器的时间距离为 λ_0 :

$$\lambda_0 = UT_C = T_0/2 = (t_s - t_0)/2 \quad (7)$$

远端站 N 的一个信令周期为 T_n :

$$T_n = t_n - t_0 = UT_C + DT_C_n + \tau_n + UT_R_n + DT_R_n \quad (8)$$

远端站 N 到卫星转发器的时间距离为 λ_n :

$$\lambda_n = DT_C_n = UT_R_n = (t_n - t_0 - \tau_n - 2\lambda_0)/2 \quad (9)$$

式中, t_0 为中心站发送一帧 TDM 广播时刻; t_n 为中心站接收到第 N 个地球站回传相邻前一帧 TDM 广播的 ALOHA 信号的时间; t_s 为中心站接收到自发自收的同一帧 TDM 帧的时刻; τ_n 为第 N 个远端站从收到 TDM 广播到发出 ALOHA 信号的时间延时。

中心站计算出各远端站的时间距离后, 排序找出最远的远端站与最近的远端站, 时间距离分别为 λ_{\max} 、 λ_{\min} , 分别计算各地球站距离最远小站的时间距离 $\Delta\alpha$ ($\lambda_{\max} - \lambda_m$) 和最近小站的时间距离 $\Delta\beta$ ($\lambda_m - \lambda_{\min}$), 每个小站发送时延 τ_m ($\lambda_0 + \lambda_m + 2\Delta\alpha + \tau_0$ 或 $\lambda_0 + \lambda_{\max} + \Delta\alpha + \tau_0$) 分别记录, 发送时延插入下行指令帧中下发给各远端站。式中, $m = 0, 1, 2, 3, \dots, n$; τ_0 为指令发送间隙。

由于测距同步在该系统中是最为基础且关键的环节, 测距结果的好坏直接影响到整个系统的通信状况。所以, 我们采用两种自相关系数较好的 32 位控制字分别作为上行测距控制字和下行测距控制字, 判决门限为 25。两种控制字的自相关性如图 8 与图 9 所示。

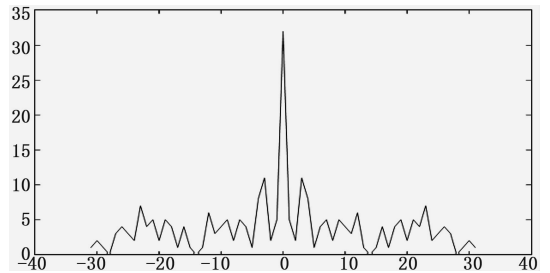


图 8 控制字一自相关性

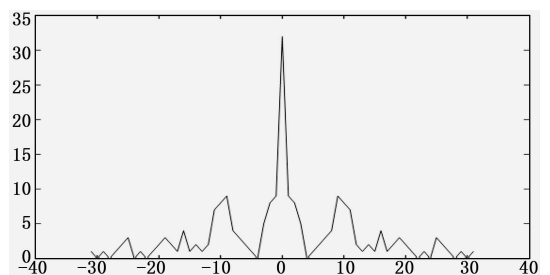


图 9 控制字二自相关性

精测距的精度与信令的传输速率有关，当信令传输速率越大，定位的数据比特码越窄，定位精度越高。信令速率与测距精度之间的关系如图 10 所示，根据精度需要和带宽资源的高效利用，网管信令速率设置为 128 Kbps。

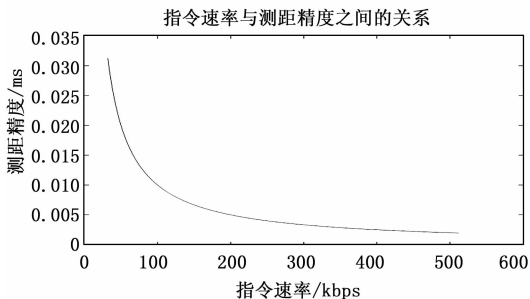


图 10 信令速率与测距精度之间的关系

根据指令信道的传输方式需要，我们在 QPSK 调制，1/2 卷积编码方式下通过在不同的信噪比条件下分别发送 100 组测距控制字，分别仿真出控制字一与控制字二的搜帧率及误比特率。结果如图 1 所示，在信噪比大于 6.8 db 时搜帧率达到 100%，测距性能较稳定。信令速率与测距精度之间的关系如图 11 所示。

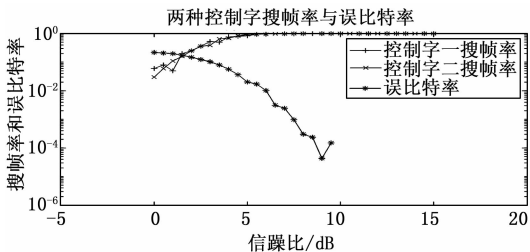


图 11 信令速率与测距精度之间的关系

5 实验结果与分析

根据设计的系统结构方案和工作流程，对现有的调制解调系统进行了相关模块的改进，搭建出了工程环境模型，在模拟网管（只控频点和速率）的控制下，对两台调制解调器的入网及数据的传输进行控制。其中，数据传输的调制解调方式采用的 QPSK，编码方式为 1/2 卷积编码。两个调制解调器载波频点设置在 1 200 MHz 与 1 300 MHz，在两个频点上互传信息并周期变化，载波速率分别设置为 128 Kbps 和 64 Kbps，并与频点一起做周期变化。通过观察解调端的星座图变化，观察载波动态调整变化过程，判断链路状态，图 12 为某一个周期变化中载波变换前后的星座图变化。

由图 12 我们可以看出，载波变化前，解调出的 QPSK 的星座图分布在 (450, 450) 和 (450, -450) 和 (-450, 450) 和 (-450, -450) 4 个点周围，均能映射出发端数据，符合正常的 QPSK 星座图分布；参数配置过程中，在新载波数据发送到收端之前，解调端会存在部分噪声信号

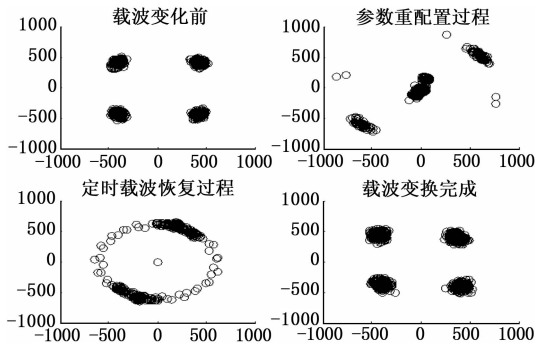


图 12 载波切换过程中解调端 QPSK 星座图

映射在 (0, 0) 附近，并且会存在少量由于测距系统时间误差导致的部分其他信道的数据映射。当载波参数配置好后，解调端映射出少量同步信号，分布在关于零点对称的在 (450, 450) 和 (-450, -450) 周围；随后解调端进行定时载波恢复，此时解调端在对频相偏进行估计纠正，相点分布在以零点为圆心，450 为半径的圆周上；最后频相偏纠正好后，相点重新变换回 QPSK 映射点位，一个载波变换周期结束。

6 结束语

该载波变换技术结合了 FDMA 稳定性高、和 TDMA 灵活性强的特点，具有很强的应用前景。目前，FDMA 系统在应急通信中应用十分广泛。根据应急通信的特点，一旦出现突发事件时，会出现大量用户进行信息交互的情况，很容易出现网络阻塞，这时网络带宽资源就显得尤其珍贵，高效利用带宽资源进行实时信息的互通对于处理应急性突发事件，挽救人民生命，保护国家财产安全起到了至关重要的作用。同时载波动态传输数据能防止出现信息监听的现象，有利于重要信息的保密工作。

参考文献:

[1] 潘申富, 王赛宇, 张 静. 宽带卫星通信技术 (第 2 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[2] 孙晨华, 张亚生, 何 辞. 计算机网络与卫星通信网络融合技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

[3] Franco D, Mario M, Muarizio M. Resource allocation in satellite networks: certainty equivalent approaches versus sensitivity estimation algorithms [J]. International Journal of Communication Systems, 2005, 18 (1): 3-36.

[4] 王方方. 基于动态频谱接入的 TDMA 网络研究与仿真 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

[5] 苑 喆, 张 军, 柳重堪. 一种简化的移动卫星网仿真方案 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (1): 207-209.

[6] Digital video broadcasting (DVB): Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB - T2) [S]. ETSI Standard, EN, 2012.