

УДК 519.872

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЯМИ ЛОГИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В КАНАЛЕ РАДИОСВЯЗИ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

С. И. Макаренко,

канд. техн. наук

Ставропольское высшее военное авиационное инженерное училище (военный институт) им. маршала авиации В. А. Судца

Приведена методика повышения показателей качества обслуживания сети специального назначения за счет адаптивного управления скоростями логических соединений в сети воздушной радиосвязи, использующей CSMA-метод доступа.

Ключевые слова — информационно-вычислительные сети, системы массового обслуживания, квазистационарный поток заявок на обслуживание, эффективность управления авиационными комплексами.

Введение

В настоящее время в информационно-вычислительных сетях, образующих информационную подсистему автоматизированной системы управления (АСУ), процесс информационного обмена на канальном уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМОС) представляется в виде модели математических схем систем массового обслуживания (СМО). При этом информационные потоки по логическим соединениям (ЛС) представляются стационарным пуассоновским потоком, а среда передачи — каналом радиосвязи множественного доступа (КМД) [1].

Однако представление реальных информационных потоков стационарной моделью существенно влияет на точность получаемых результатов. Исследования [2–4] показали, что в большей степени данное влияние проявляется при расчете параметров сети информационного обеспечения АСУ реального времени, в частности, параметров сети связи АСУ авиационными комплексами перехвата (АКП).

Порядок ретрансляции сообщений в сети воздушной радиосвязи (СВРС) определяется алгоритмом случайного многостанционного доступа (АСМСД), который представляется моделью СМО «ненастойчивый множественный доступ с проверкой несущей» [1, 5]. Проведенный анализ информационного обмена телекодированной информацией между пунктом управления и АКП в СВРС [2, 3, 5] показал, что реальный входной поток, поступающий на вход КМД, значительно отличается от

стационарного. Интенсивность информационного обмена может существенно меняться в зависимости от тактической обстановки в районе боевых действий и типа решаемой боевой задачи. В общем виде входной поток имеет две сопоставимые по уровню составляющие: нестационарную (данные тактической обстановки, информационное обеспечение боевых действий) и стационарную (циклические запросы о параметрах полета, команды управления и др.). Моделирование КМД моделью СМО «ненастойчивый множественный доступ с проверкой несущей» позволяет определить время задержки пакета как функцию от интенсивности информационного обмена λ [1]:

$$T_3 = \frac{D_{\text{mes}}}{C} \left[\left(\frac{\lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{\text{max}} C}{c D_{\text{mes}}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{\text{max}} C}{c D_{\text{mes}}} \right], \quad (1)$$

где $S = \frac{(\lambda e^{-(\lambda d_{\text{max}}/c D_{\text{mes}})})}{(\lambda(1+2(d_{\text{max}} C/c D_{\text{mes}})) + C e^{-(\lambda d_{\text{max}}/c D_{\text{mes}})})}$; D_{mes} —

объем пакета; C — пропускная способность канала связи (КС); d_{max} — радиус сети; c — скорость распространения электромагнитных волн; K — количество повторов сообщения в случае ошибки при отправке.

Анализ ошибок в определении времени доставки сообщений показал, что представление потока информационного обмена в стационарном виде (без введения в модель сети элементов, учитывающих

нестационарную составляющую входного потока) при одиночном наведении АК ведет к ошибке в определении задержки сообщений на отдельных этапах выполнения боевого задания.

Вероятность наземного наведения АКП:

$$P_{н.н} = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{T_n(m_Q + \Delta Q_{доп})}{2T_3} \right) - \Phi \left(\frac{T_n(m_Q - \Delta Q_{доп})}{2T_3} \right) \right], \quad (2)$$

где T_n — дискретность выдачи управляющих воздействий на АКП; m_Q — математическое ожидание маневра цели по курсу; $\Delta Q_{доп}$ — допустимые ошибки по курсу, исправляемые АКП в процессе самонаведения.

Поскольку вероятность наведения АКП $P_{н.н}$ прямо зависит от задержек сообщений управления, то это ведет к ошибке в определении вероятности наведения, возрастающей при увеличении числа управляемых АКП [6].

Таким образом, противоречие между реальными потоками данных в КМД, имеющими нестационарную интенсивность, и моделью КМД как СМО со стационарным входным потоком ведет к ошибкам в определении времени доставки сообщений и, как следствие, к снижению вероятности наведения. В интересах поддержания вероятности наведения АКП на заданном уровне ($P_{н.н.з}$) необходимо обеспечить перераспределение скоростей M ЛС, входящих в состав КМД, в начале каждого цикла управления. При этом каждое из ЛС в составе КМД принадлежит каналу наведения соответствующего АКП. Таким образом, для компенсации влияния нестационарности информационного обмена на процесс наведения АКП необходимо создание адаптивной к нестационарному потоку методики управления ресурсами СВРС.

Постановка научной задачи

В формализованном виде задачу поддержания вероятности наведения АКП на заданном уровне можно представить как минимизацию скорости каждого m -го ЛС C_m в КМД при векторе условий на варьируемые параметры V , векторе ограничений R , векторе граничных условий G и векторе неопределенных случайных возмущений E в зависимости от интенсивности входного потока λ_m , заданной вероятности наведения АКП $P_{н.н.з}$ и параметров сети $D_{мес}$, d_{max} , K :

$$\min_{(V, R, G, E)} C_m(\lambda_m, P_{н.н.з}, D_{мес}, d_{max}, K). \quad (3)$$

Вектор варьируемых параметров V определяется диапазоном изменения интенсивностей информационного обмена в m -х КС за период выполнения M АКП своих боевых заданий:

$$V = \begin{cases} \lambda \neq \text{const} | T_{набл} \\ T_{набл} \in [0, T_{навАК}] \end{cases}. \quad (4)$$

Вектор G задает граничные условия значений интенсивности $\lambda(t)$ (разрыв 1-го рода функции $\lambda(t)$) при переходе от $(i-1)$ -го цикла управления к i -му в момент t_i . Вектор G зависит от двух составляющих интенсивности информационного обмена — нестационарной $\lambda_{var}(t)$ и стационарной $\lambda_{det}(t)$:

$$G = \begin{cases} \lim_{t \rightarrow (t_i-0)} \lambda(t) - \lim_{t \rightarrow (t_i+0)} \lambda(t) = \Delta\lambda(t_i) \\ \Delta\lambda(t_i) = \Delta\lambda_{det}(t_i) + \Delta\lambda_{var}(t_i) \\ \Delta\lambda_{det}(t_i) = \text{const} \\ \Delta\lambda_{var}(t_i) \neq \text{const} \end{cases}. \quad (5)$$

Вектор ограничений R определяется совокупностью ограничений на исходные данные и переменные. К таким ограничениям относятся как условие постоянства общей пропускной способности КМД, так и условия соответствия тактико-технических характеристик рассматриваемых СВРС и АСУ параметрам модели ($P_{н.н.з}$, λ , M , $D_{мес}$, d_{max} , K). В состав ограничений R включены ограничения на существующие и используемые в данном исследовании модели (R_{model}):

$$R = \begin{cases} \sum_{(M)} C_m = \text{const} \\ P_{н.н}(C_M) \in \{P_{н.н \min}\}_{доп} \\ \lambda \in \{\lambda\}_{доп} \\ M \in \{M\}_{доп} \\ D_{мес} \in \{D_{мес}\}_{доп} \\ d_{max} \in \{d_{max}\}_{доп} \\ K \in \{K\}_{доп} \\ R_{model} \end{cases}. \quad (6)$$

Вектор E включает в себя всю совокупность случайных возмущений на модель КМД, которые не могут быть формализованы в явном виде, но оказывают воздействие на процесс синтеза методики адаптивного управления скоростями ЛС КМД в условиях квазистационарности потоков данных.

Таким образом, проведенный анализ информационного обмена между АКП и ПУ позволяет сделать вывод о том, что входной поток, поступающий на вход КМД, существенно отличается от стационарного. Представление потока информационного обмена в стационарном виде (без введения в модель сети элементов, учитывающих нестационарную составляющую входного потока) ведет к ошибке определения вероятности наведения АКП на цель. В интересах поддержания вероятности наведения АКП на заданном уровне поставлена задача разработки методики адаптивного распределения скоростей ЛС КМД в новых условиях

квазистационарного входного в КМД потока с учетом заданной вероятности наведения АКП.

Методика

Нестационарный поток информационного обмена между пунктом управления и АКП может быть представлен в квазистационарном виде путем разбиения времени информационного обмена на интервалы T_n , равные циклам управления АСУ. Внутри каждого из интервалов поток представляется в стационарном виде, а значения интенсивности при переходе к следующему циклу управления определяются вектором \mathbf{G} (5). Для решения задачи адаптации параметров КМД к квазистационарному потоку информационного обмена $\lambda(t)$ предложена декомпозиция оценки информационного обмена на постоянную $\lambda_{det}(t)$ и переменную $\lambda_{var}(t)$ составляющие. Для получения аналитической функции значений переменной составляющей информационного обмена $\tilde{\lambda}_{var}(t)$ используется аппроксимация $\lambda_{var}(t)$ методом наименьших квадратов, что позволяет получить аппроксимирующие уравнения $\tilde{\lambda}_{var}(t)$ линейного

$$\tilde{\lambda}_{var}(t) = \frac{12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{n^3 - n} t + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (7)$$

и параболического типа

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_{var}(t) = & \frac{15 \left(12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i - n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)}{n^5 - 5n^3 + 4n} t^2 + \\ & + \frac{12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{n^3 - n} t + \frac{(9n^2 - 21) \sum_{i=1}^n \lambda_i - 60 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2}{4n(n^2 - 1)}, \quad (8) \end{aligned}$$

где n — число значений оценки интенсивности $\lambda_{var}(t)$; λ_i — стационарное значение переменной составляющей информационного потока $\lambda_{var}(t)$ на i -м цикле управления; t_i — дискретные моменты времени, соответствующие началу i -го цикла управления.

Применение интерполяционных многочленов и полиномиальных моделей (полиномов Лагранжа, Чебышева и Ньютона) нецелесообразно из-за необходимости дополнительной проверки на сходимость за пределами статистической выборки. Выбор типа модели определяется выполнением условия стремления к нулю ускоряющейся составляющей параболического аппроксимирующего уравнения (8):

$$\lim_{n \rightarrow n_0} \frac{15 \left(12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i - n^2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)}{n^5 - 5n^3 + 4n} = 0, \quad (9)$$

где n_0 — текущее значение циклов управления, на котором возможно использование линейной аппроксимации (7).

Выполнение условия (9) позволяет использовать для аппроксимации нестационарной составляющей $\lambda_{var}(t)$ уравнение линейного типа (7), а уравнение (8) — в противном случае.

Проверка адекватности уравнений (7) и (8), аппроксимирующих нестационарную составляющую квазистационарного потока $\lambda_{var}(t)$, производится:

— по коэффициенту детерминации аппроксимирующего уравнения

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\tilde{\lambda}_{var}(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{var i} n_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\lambda_{var i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{var i} n_i \right)^2}; \quad (10)$$

— коэффициенту корреляции рангов Спирмена

$$\rho = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n \left(\lambda_{var i} - \tilde{\lambda}_{var}(t_i) \right)^2; \quad (11)$$

— оценке средней ошибки аппроксимации

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_{var i} - \tilde{\lambda}_{var}(t_i)|}{\lambda_{var i}} \quad (12)$$

и определяется выполнением комплексного условия

$$\begin{cases} \lim_{n \rightarrow n_0} B = 1 \\ \lim_{n \rightarrow n_0} \rho = 1 \\ \bar{e} \leq 0,15 \end{cases} \quad (13)$$

Уравнения (7) и (8) позволяют получить максимальную интенсивность информационного потока $\tilde{\lambda}(t_k)$ в следующий цикл управления АСУ t_k для каждого из ЛС КМД в виде функции (14) с учетом ошибок аппроксимации $\Delta \tilde{\lambda}_{var}(t_k)$, определяемых выражением (12):

$$\tilde{\lambda}(t_k) = \lambda_{det}(t_k) + \tilde{\lambda}_{var}(t_k) + \Delta \tilde{\lambda}_{var}(t_k); \quad (14)$$

$$\Delta \tilde{\lambda}_{var}(t_k) = t m_{\tilde{\lambda}}(t_k), \quad (15)$$

где t — величина t -критерия Стьюдента при доверительной вероятности β ; $m_{\tilde{\lambda}}(t_k)$ — средняя ошибка аппроксимации.

Вероятность наземного наведения $P_{н.н}$, определяемая выражением (2), при допущении об отсутствии маневра цели по курсу ($m_Q = 0$) будет иметь вид

$$P_{н.н} = \Phi \left(\frac{T_n \Delta Q_{доп}}{2T_3} \right), \quad (16)$$

где

$$T_3 = \frac{T_n \Delta Q_{доп}}{2 \arg \Phi(P_{н.н})}. \quad (17)$$

Выражение (17) будет определять время минимальной задержки сообщений T_3 при заданной вероятности наведения $P_{н.н} = P_{н.н.3}$. Приравняв выражение (17) к времени задержки сообщений в ЛС КМД (1) и обозначив $A = d_{\max}/(cD_{\text{мес}})$, получим уравнение относительно скорости ЛС КМД C при прочих заданных параметрах ($P_{н.н}, \lambda, M, D_{\text{мес}}, d_{\max}, K, T_{\text{н}}, \Delta Q_{\text{доп}}$):

$$\left(AD_{\text{мес}} - \frac{T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}}}{2 \arg \Phi(P_{н.н})} + \frac{4\lambda A^2 D_{\text{мес}}}{e^{-A\lambda}} \right) + \frac{1}{C} \left(D_{\text{мес}} + \frac{2\lambda AD_{\text{мес}}(K+2)}{e^{-A\lambda}} \right) + \frac{1}{C^2} \left(\frac{\lambda D_{\text{мес}}(K+1)}{e^{-A\lambda}} \right) = 0. \quad (18)$$

Исследование корней уравнения (18) показало, что данное уравнение на диапазоне допустимых в реальном КМД варьируемых параметров имеет единственное решение:

$$C_{1,2} = \frac{D_{\text{мес}}(\arg \Phi(P_{н.н})) \left(-4A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))(K+2) - e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} \right)}{4AD_{\text{мес}}(\arg \Phi(P_{н.н})) \left(e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} + 4(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))A \right) - 2T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}} e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))}} \pm \sqrt{\frac{D_{\text{мес}}(\arg \Phi(P_{н.н})) e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} \left[4(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))AD_{\text{мес}}(\arg \Phi(P_{н.н})) + 2(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}}(K+1) \right]}{4AD_{\text{мес}}(\arg \Phi(P_{н.н})) \left(e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))} + 4(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))A \right) - 2T_{\text{н}} \Delta Q_{\text{доп}} e^{-A(\tilde{\lambda}_{\max}(t_k))}}}}, \quad (19)$$

где $\arg \Phi(P_{н.н})$ — такое значение аргумента функции $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, при котором функция $\Phi(x)$ принимает значение $P_{н.н}$.

Таким образом, решением задачи (3) является функция необходимой скорости ($C_{\text{необ}}$) m -го ЛС (19) при условиях **V, G, R** (4)–(6). В функции (19) параметр λ является варьируемым и определяется функцией (14), а параметры $D_{\text{мес}}, \lambda, K, d_{\max}, P_{н.н}$ являются ограничениями на решение задачи (3) и определяются тактико-техническими характеристиками СВРС и требованиями по боевой эффективности АКП.

Исследование зависимости функции необходимой пропускной способности ЛС КМД (19) от численных значений объема пакета в КМД $D_{\text{мес}}$, количества повторов сообщения в случае ошибки при отправке K , минимально допустимой вероятности наведения АКП $P_{н.н}$ и максимального радиуса КМД d_{\max} показало, что в интересах снижения требуемой общей пропускной способности СВРС необходимо обеспечить минимизацию параметров $D_{\text{мес}}, K$ и $P_{н.н}$ в рамках допустимых тактико-технических характеристик СВРС.

При исследовании влияния вектора **E** на функцию (19) путем воздействия случайной составляющей в показателях: повторных передач сообщений K , реально выделенной скорости ЛС КМД C , ошибочно оцененных интенсивностях на предыдущих этапах управления $\Delta \tilde{\lambda}_{\text{вар}}(t_k)$ — выявлено, что увеличение ошибок в определении вышеуказанных показателей существенно снижает коэффициент детерминации (10) и адекватность получаемых аппроксимирующих уравнений (7), (8), определяемых условием (13). Это ведет к росту времени накопления статистических оценок интенсивности на этапах управления АКП для соответствия аппроксимирующих уравнений (7), (8) критерию адекватности (13).

Перспективный АСМСД использует для доступа к КМД метод случайного доступа CSMA/CD, описываемый стандартом IEEE 802.3, на MAC-подуровне (Media access control — управление доступом к устройствам) канального уровня ЭМВОС. Для решения частной задачи реализации методики адаптивного распределения скоростей ЛС в КМД был модифицирован метод доступа CSMA/CD и на его основе синтезирована методика управления доступом ЛС к КМД за счет варьирования длительности паузы захвата КМД.

Зависимость между скоростью передачи по каждому из ЛС ($C_{\text{необ } m}$) и вероятностью доступа m -го ЛС к среде передачи КМД (P_m) определяется следующим равенством:

$$\frac{1}{C_e} \sum_{m=1}^M C_{\text{необ } m} = \sum_{m=1}^M P_m = 1. \quad (20)$$

При этом вероятность доступа каждого из ЛС P_m будет зависеть от общей эффективной пропускной способности КМД C_e , определяемой выражением

$$C_e = \frac{\lambda C e^{-\frac{d_{\max} \lambda}{c D_{\text{мес}}}}}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{c D_{\text{мес}}} \right) \lambda + C e^{-\frac{d_{\max} \lambda}{c D_{\text{мес}}}}}. \quad (21)$$

В методе доступа CSMA/CD требования по скорости передачи данных по ЛС равны для каждого из ЛС ($C_{\text{необ}1} = \dots = C_{\text{необ}m} = \dots = C_{\text{необ}M}$). То есть доступ ЛС к среде передачи КМД равновероятен ($P_1 = \dots = P_m = \dots = P_M$), определяется выражением

$$P_m = \frac{1}{M} \quad (22)$$

и не зависит от интенсивности информационного обмена.

Однако при информационном обмене между АКП и пунктом управления на вход КМД поступает квазистационарный поток, и требования по скорости каждого ЛС ($C_{\text{необ}m}$) неравны ($C_{\text{необ}1} \neq \dots \neq C_{\text{необ}m} \neq \dots \neq C_{\text{необ}M}$) и определяются выражением (19). В этом случае необходимая вероятность доступа к КМД будет зависеть от адаптивных требований каждого из ЛС ($C_{\text{необ}m}$) к прогнозируемым интенсивностям информационного обмена λ и определяться выражением

$$P_m = \frac{C_{\text{необ}m}}{C_e} \quad (23)$$

Таким образом, при практической реализации новой методики адаптивного управления доступом ЛС к КМД потребуются изменение параметров протокола управления доступом и захватом канала. Анализ алгоритма захвата канала, соответствующий методу CSMA/CD, показал, что захват канала осуществляется за счет генерации случайной (равномерно распределенной по одинаковой для всех ЛС длительности паузы захвата КМД $T_{\text{захв}}$) задержки передачи данных. Предлагается осуществить распределение скоростей ЛС с помощью адаптивного управления длительностью паузы захвата КМД в каждом из ЛС.

При этом адаптивная длительность паузы захвата канала в m -м ЛС ($T_{\text{захв}m}$) будет определяться выражением

$$T_{\text{захв}m} = T_{\text{захв}} \frac{C_{\text{необ}m}}{C_e} \quad (24)$$

и зависеть от необходимой скорости ЛС ($C_{\text{необ}m}$), что отличается от метода CSMA/CD, предполагающего равные скорости передачи данных по ЛС:

$$T_{\text{захв}} = \text{const.}$$

Соотношение (24) позволяет применить данный подход ко всему классу протоколов случайного доступа с постоянной длительностью паузы захвата КМД для формирования новых, адаптивных к необходимой скорости, правил захвата КМД.

Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что методика адаптивного распределения скоростей ЛС в КМД за счет введения элементов аппроксимации лучше оценивает квазистационар-

ный информационный поток, циркулирующий между абонентами КМД. При этом максимальная оценка значений квазистационарного потока и аналогичная оценка того же потока как стационарного с незначительными отклонениями могут совпадать. Однако за счет введения в указанную методику ограничений по вероятности наведения, даже при совпадающей оценке интенсивностей потоков, требования к скорости ЛС КМД существенно различаются (при реализации предлагаемой методики — выше). Это обусловлено тем, что при наличии критически больших значений интенсивности входного потока адаптивное управление использует все возможности по пропускной способности КМД для поддержания заданной вероятности наведения. Между тем неадаптивное назначение скоростей ЛС производит распределение скорости ЛС не в соответствии с потребностями в объемах передаваемой информации, а в соответствии с количеством абонентов КМД, что представляет собой довольно грубую оценку необходимых ресурсов. Вероятность доступа к КМД существенно меняется в зависимости от оцененной интенсивности информационного обмена на всем протяжении полета АКП и определяется количеством АКП, находящихся на управлении АСУ, и потребностями в передаче информации. Это значительно отличает предлагаемый алгоритм от существующего, в котором вероятность доступа определяется как величина, обратная количеству управляемых АКП без учета потребности абонентов в информационном обмене.

Литература

1. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 600 с.
2. Макаренко С. И. Методика оценки времени задержки пакета в канале связи в условиях нестабильности входного трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 3. С. 94–96.
3. Макаренко С. И., Сидорчук В. П., Краснокутский А. В. Методика оценки времени задержки пакета в сети воздушной радиосвязи в условиях нестабильности входного трафика // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 6. С. 70–74.
4. Макаренко С. И., Кихтенко А. В. Методика оценки времени задержки пакета в спутниковой сети связи в условиях нестабильности входного трафика // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 1.3 (27). С. 344–348.
5. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: Монография / Под ред. Е. А. Федосова. М.: Дрофа, 2005. 815 с.
6. Боевое применение и боевая эффективность авиационных комплексов войск ПВО страны / Под ред. В. Н. Абрамова. М.: Военное издательство МО СССР, 1979. 520 с.