

Véletlen hozzáférésű rádiócsatornák alkalmazása számítástechnikai hálózatokban

ETO 519.2:621.396.4:681.324

Számítástechnikai hálózatokban alkalmazott kommunikációs csatornák (vezetékes vagy rádiócsatornák) felhasználásának (felosztásának) módjait az adott hálózat céljainak, az üzenetforgalom sajátosságainak megfelelően célszerű meghatározni.

Az egyik lehetséges cél *területileg szétszított számítástechnikai erőforrások kihasználása*. Azaz a lényeg itt annak biztosítása, hogy az egyes felhasználók (a továbbiakban gyakran a terminál megjelölést fogjuk használni) ne csak a saját komputerükhöz férjenek hozzá, hanem — azon keresztül, és/vagy erre a célra szolgáló kommunikációs illesztőegységen keresztül — más számítóközpontokhoz is. Az egyes üzenetek továbbítása a rendszer csomópontjait, kapcsolópontjait összekötő adatátviteli vonalakon történhet pl. — a szokásos terminológiával élve — *vonalkapcsolással* („line-switching”, „circuit-switching”), amely jelentős időt igényel amiatt, hogy az üzenet elküldése előtt az összeköttetés teljes útvonalának fel kell épülnie. Rugalmasabb megoldást ad az *üzenetkapcsolás* („message-switching”), amelynél egyidejűleg szabad út csak a legközelebbi csomópontig kell, s az üzenet a célt ily módon „ugrálva”, az előző esetnél lényegesen rövidebb idő alatt érheti el. Végül a leghatékonyabb módszer az üzenetek rövid, egyszerű adagokra, csomagokra való feldarabolása, az ún. *csomagkapcsolás* („packet-switching”), amelynél az üzenetekből alkotott csomagok szinte akadálytalanul „folynak” a hálózatban. Csomagolt számítástechnikai hálózatok egy létező jólismert példája az ARPANET [1].

Egy másik jellegzetes számítógéphálózat-típus (és szintén már létező rendszer: az ALOHANET [2]) esetén a cél nagy számú interaktív felhasználónak egy központi számítástechnikai erőforráshoz, számítóközpontozhoz, vagy akár egy másik magas szintű hálózathoz való hatékony hozzáférése. Ember-gép kapcsolatokban többnyire igaz az, hogy egy felhasználó csak az idő kis százalékában aktív, így a csomagolási technika jól alkalmazható. Emellett azonban szinte önként adódik az is, hogy használjunk egy közös, nagy kapacitású rádiócsatornát, s annak felosztását bizzuk bizonyos fokig a véletlenre, pontosabban egy automatizmusra, amelynek pusztán a működési szabályait kötik ki (véletlen hozzáférés vagy statisztikus nyálábolás — „random access”, „statistical multiplexing”). Ennél a véletlen nyálábolásnál elvi ok miatt is kisebb csatornakapacitásra lehet szükség mint — az egyes felhasználók egyidejű igényére méretezett — fix frekvencia- vagy időosztásnál. Még lényegesebb azonban, hogy az így létreho-

zott rendszer igen kötetlenül tud felhasználóinak rendelkezésére állni, széles határokon belül könnyen módosítható és bővíthető.

A véletlen hozzáférés lényegéből adódóan két vagy több felhasználó közel egy időben jelentkezhet igényével, így az ilyen rendszerekben elkerülhetetlenek az összeütközések (két vagy több csomag részben vagy teljesen átfedi egymást), többség van tehát azok felismerésére és ilyen csomagok megismétlésére. A sikertelen csomagküldés felismerésére több lehetőség is van, a legegyszerűbb a helyzet műholdas ismétlő esetén, amikor adott terjedési idő múltán a felhasználó visszahallja a saját adását. Földi hálózatnál a központ küldhet sikeres beérkezés esetén pozitív visszajelzést, s ennek hiánya indít el a felhasználónál ismétlést. Mindkét esetben azt használjuk ki, hogy a rádiócsatorna az egyik irányban a műsorszórási csatornára hasonlít, azaz a központ (vagy központi ismétlő) adását minden felhasználó veszi. Ez a véletlen hozzáférésű rendszerek lényeges tulajdonsága, amelyből még további előnyök is fakadnak. (Ezt gyakran az elnevezések is hangsúlyozzák: „packet broadcasting”, „computer broadcasting”).

Ami a történeti áttekintést illeti, reménytelennek tűnik annak felderítése, hogy a dolog lényegét jelentő csomagkapcsolási és véletlen hozzáférési elveket ki, hol publikálta először. Mint azt hasonló alapvető elveknél gyakori, nyilván egyszerre többen jöttek rá és kezdtek el analízálni az ilyen rendszereket. Az egyik legkorábbi próbálkozásnak [4] tűnik. Csomagkapcsolt számítógéphálózat felépítésére az [5]-ben tettek javaslatot, az ARPANET-rendszer kiépítése 1969-ben kezdődött. Véletlen hozzáférésű rádiócsatornán történő csomagkapcsolást N. Abramson javasolt konkrét földi rendszerben megvalósítani [6]. Az ALOHA-rendszer kiépítése 1970-ben kezdődött. Többéves fejlesztés és üzemeltetés után készült az első rendszerről az [1]-ben található, a másodikkal kapcsolatban a [3] összefoglalás. Legalábbis ezeket találta a szerző — saját szempontjából — a legtanulságosabbnak. Végül az analízisre szolgáló elméleti apparátus tömegkiszolgáló, pontosabban sorbaállítós rendszerekkel foglalkozó monográfiákban található meg [7, 8].

Jelen áttekintő cikk első részében a véletlen hozzáférésű, rádiócsatornát alkalmazó csomagkapcsolt kommunikációs hálózatok legfontosabb tulajdonságainak jellemzésével foglalkozunk összefoglaló jelleggel, a témakör gazdag irodalma alapján. Kitérünk mindenekelőtt a tisztán véletlen hozzáférésű és az ún. réselt rendszer határlehetőségeire (1.1 pont), a csomagkésési idők alakulására (1.2 pont), megmutatjuk az instabilitás válás jelenségét és a stabilitás biztosításá-

nak módjaira is utalunk (1.3 pont). Az 1.4 pontban azokkal a rendszerekkel foglalkozunk, amelyekben járulékos és jól kihasználható körülmény a csatorna foglaltságának érzékelése. Végül összehasonlítást teszünk a fix nyálábólású rendszerekkel (1.5 pont).

A második részben két gyakorlati alkalmazási példát ismertetünk. Először a véletlen hozzáférésű rádiócsatornák jól ismert alaptípusának, az ALOHA-rendszernek néhány jellegzetességét foglaljuk össze (2.1 pont) ugyancsak az irodalom alapján, majd azt mutatjuk meg, hogyan alkalmazhatunk véletlen hozzáférésű rádióterminálokat egy, a szokásos alfa-numerikus interaktív termináloktól némiképp eltérő rendeltetésű távadat-feldolgozás során, nevezetesen számítógéppel segített kardiológiai kísérletekben (2.2 pont). Ez utóbbi témában a szerző azoknak a tanulmányoknak és kísérleteknek jelenlegi helyzetéről számol be, amelyekben maga is részt vesz [13, 14, 15].

Véletlen hozzáférésű rádiócsatornát alkalmazó, csomagkapcsolt kommunikációs hálózatok általános jellemzése

1.1 A tisztán véletlen hozzáférésű és a „réselt” csatorna kapacitása

Tekintsük a véletlen hozzáférésű, csomagkapcsolt hálózatoknak azt az egyszerű, általános modelljét, amikor egy központ szolgál ki sok felhasználót (csillag-hálózat). Valamennyi felhasználó veszi a központ adását, egymásét azonban nem feltétlenül hallják.

Az egyes felhasználók, ill. a központ üzenetei legyenek azonos, T hosszúságú adatsomagok, amelyek a továbbítandó információon kívül a terminál címét is tartalmazzák, tehát azonosíthatók. A legegyszerűbb esetben a terminálok elkészült csomagjukat bármikor elküldhetik. A központ a sikeresen beérkezett csomagról visszajelzést, nyugtázást küld. Összeütközés esetén ez a visszajelzés elmarad, és az érintett terminál a csomagot ismételtlen elküldi (az újabb biztos összeütközés elkerülésére egy adott intervallumból véletlen módon megválasztva a késleltetési időt).

Vezessünk be két fontos jellemzőt: a csatorna átvitelt, S' -t mint a sikeresen átjutott csomagok időegységankénti átlagos számát és a csatorna forgalmat, G' -t mint az összes (sikeres + összeütközött) csomagok időegységankénti átlagos számát, valamint ezeknek a T csomaghosszra vonatkozó normált megfelelőit: $S = S'T$, $G = G'T$ (ez utóbbiakban gondolkozva, egy fix időosztásos rendszerben tökéletes szinkronizálás esetén $S = 1$). Végül még egy definíció: az átvitel maximális értékét a csatorna kapacitásának fogjuk nevezni.

Elsőként az átvitel-forgalom-összefüggésre lehetünk kíváncsiak. Legegyszerűbben akkor juthatunk eredményhez, ha a csatorna teljes forgalmát Poisson-folyamatnak tekintjük. Ez a modell az alábbi két közelítést foglalja magában:

- a felhasználók száma végtelen;
- nem teszünk különbséget az újonnan generált és az ismételt csomagok között.

Jóllehet e közelítések durvának tűnnek, a szimulációs eredmények meglepően jó egyezést mutatnak a Poisson-forgalommodellel néhány tíz felhasználó esetén és akkor, ha az ismétlési késleltetési időt a csomaghossznál nagyságrenddel nagyobbra választjuk.

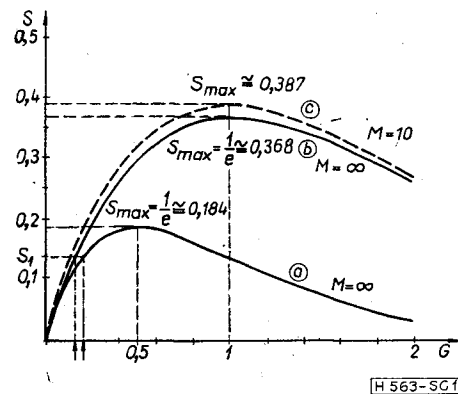
Modellünkben a csatorna átvitele $S = G \cdot P_0$ lesz, ahol P_0 annak a valószínűsége, hogy nem generálódott újabb csomag az adott csomag ideje és a megelőző T idő alatt (azaz a $2T$ hosszú sebezhető periódusban). A P_0 valószínűséget a

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

Poisson-eloszlásból határozhatjuk meg, a fentieknek megfelelően $\lambda = G$, $t = 2$ és $k = 0$ helyettesítéssel. Ekkor

$$S = G \exp(-2G), \quad (2)$$

adódik a keresett összefüggésre (1. ábra, a) görbe) [3].



1. ábra. Az átviteli tényező-forgalom viszony alakulása. a) egyszerű véletlen hozzáférésű, b) és c) réselt csatorna, c) véges terminálszám

A réselt véletlen hozzáférésű rendszerben egy-egy csomag csak a T hosszúságú időrésekben helyezkedik el. Mivel itt most két vagy több csomag vagy nem ütközik, vagy teljesen átfedi egymást, azaz a sebezhető periódus az előzőnek fele, a kapacitás is nagyobb lesz, a (2) összefüggésből is kiadódó (3) képlet szerint:

$$S = G \exp(-G), \quad (3)$$

(l. a b) görbét az 1. ábrán).

Az átvitel maximális értékei, $S_{max} = 1/2e$, ill. $S_{max} = 1/e$, eszerint jóval a fix időosztással realizálható elvi határ alatt vannak. Ebből azonban nem kell korai következtetéseket levonni, hiszen egyrészt a véletlen hozzáférésű rendszereket általában nem a kapacitásukon üzemeltetik, másrészt azok összehasonlítására kritériumként az $S = f(G)$ összefüggés maximumát felhasználni még félrevezető is lehet. Sokkal lényegesebb e görbék emelkedési meredeksége. Egy adott $S = S_1$ munkaponthoz az 1. ábra szerint a réselt csatornában kisebb G , azaz durván szólva, átlagban kevesebb ismétlés, kisebb késési idő tartozik, így ez a rendszer ebből a szempontból is jobb. Erről az 1.2 pontban még pontosabban is szólunk.

Megjegyezzük, hogy a vizsgált két csatornát az irodalom gyakran nevezi egyszerű, ill. réselt ALOHA-

csatornának, a Hawaii Egyetemen megvalósított rendszer nevét használva. E megjelöléseket a továbbiakban mi is használni fogjuk.

Utalunk még arra, hogy a réselt csatornák környezetben analizálhatók, így a réselt ALOHA-csatorna kapacitása véges számú terminál esetén is könnyen levezethető. Itt is tételezzük fel, hogy az egyes terminálok csomagküldései (újak vagy ismétlések) független események. Egy felhasználó, az m -edik forgalma:

$G_m = P$ {az m -edik terminál csomagot küld egy adott résben}. Az átlagos résenkénti forgalom eszerint $G = \sum_{m=1}^M G_m$ lesz. Az m -edik terminál átvitele:

$S_m = P$ {az m -edik terminál csomagja sikeres}.

A teljes átvitel $S = \sum_{m=1}^M S_m$ lesz csomag/rés-ben kifejezve. S_m -re a következő kifejezés adódik, amely pusztán azt fejezi ki, hogy a sikeres átvitel feltétele, hogy az m -ediken kívül más nem küld csomagot:

$$S_m = G_m \prod_{i \neq m} (1 - G_i); \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

Abban a parciális esetben, amikor az egyes terminálok aktivitását statisztikusan egyformának tételezzük fel, $S_m = S/M$ és $G_m = G/M$, így (4)-ből most

$$S = G \left(1 - \frac{G}{M}\right)^{M-1}, \quad (5)$$

adódik. $M \rightarrow \infty$ esetén a Poisson-folyamat feltételezésével kapott (3) összefüggést kapjuk. A (3) és (5) összefüggések már viszonylag nem nagy M esetén is jól egyeznek, $M = 10$ esetét az 1. ábrán szaggatott vonallal ábrázoltuk (c) görbe). Megjegyezzük végül, hogy véges M esetén az átvitel az $M \rightarrow \infty$ esetnél nagyobb lesz.

1.2 A csomagkésési idő-átvitel viszony alakulása

Az előző pontban az ALOHA-csatornák stacionárius állapotát jellemeztük az átvitel kiszámításával. Ezt a jellemzést most az átlagos csomagkésési idő vizsgálatával folytatjuk, majd az 1.3 pontban figyelembe vesszük a véletlen hozzáférésű rádiócsatornák inherens tulajdonságát, az instabilitást is, utalunk annak mennyiségi jellemzésére és a stabilitás biztosításának módjára.

Átlagos csomagkésési időnek (\bar{D}) az adott új csomag kezdetétől a sikeres vétel időpontjáig tartó idő várható értékét nevezzük. Ez a véletlen hozzáférésű rendszerek fontos jellemzője, amelyet a csatorna átvitelével együtt, annak függvényében célszerű figyelembe venni.

Könnyen áttekinthető a csomagkésési idő alakulása, ha fenntartjuk az 1.1 pont szerinti Poisson-forgalommodell, két további egyszerűsítő feltétellel:

- a pozitív visszajelzés elkészítéséhez a központi vezérlőegységnek elhanyagolhatóan kis időre van szüksége,
- a visszajelzést a terminál mindig helyesen veszi.

Jelölje R az adott csomag két szomszédos elküldése (ismétlése) közötti időt:

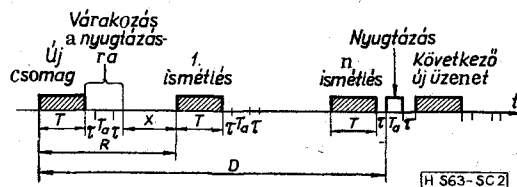
$$R = T + \tau + T_a + \tau + x, \quad (6)$$

- ahol: T - a csomag hossza,
- τ - a terjedési idő,
- T_a - a nyugtázó üzenet hossza,
- x - az ismétlés véletlen késleltetésének értéke

Az átlagos csomagkésési idő pedig

$$\bar{D} = \left(\frac{G}{S} - 1\right) \bar{R} + T + \tau; \quad \bar{R} = T + T_a + 2\tau + \bar{x}, \quad (7)$$

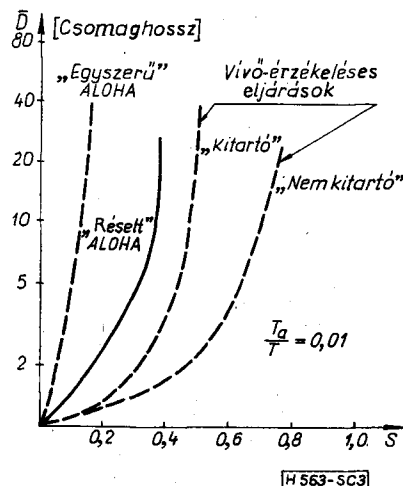
lesz, mivel $(G/S - 1)$ modellünkben az ismétlések átlagos száma [10]. A felülvonás az átlagolást jelenti. A viszonyokat a 2. ábrán illusztráltuk.



2. ábra. A csomagkésési idő alakulása

A (7) összefüggés kiértékelésével kapcsolatban először is megjegyezzük, hogy a benne szereplő G/S viszony már önmagában is bizonyos fokig jellemzi a csomagkésési időket, ahogy erre a megelőző pont végén az 1. ábrán is utaltunk. Azonban nem biztos, hogy jó összehasonlítási alap is az egyes véletlen hozzáférésű rendszerek között, hiszen azokban R , S és D még különbözőképpen alakulhat. Itt fontos szerepe van a bevezetett x véletlen késleltetésnek. Várható, hogy csökkentésével is, növelésével is növekedhet a csomagkésési idő, és minden S -hez tartozik egy x_{opt} érték, amelynél D minimális.

Ez az optimalizálás analitikusan nehezen végezhető el, s ilyen eredmények csak a réselt ALOHA-csatornára ismeretesek [9]. Az egyszerű ALOHA-csatornára, és az 1.4 pontban ismertetésre kerülő vívő-érzékeléses eljárásokra [10]-ben közöltek számítógépes szimulációs eredményeket. Az 3. ábrán ezek



3. ábra. A csomagkésési idő a csatornaátviteli tényező függvényében

közül feltüntetjük a már tárgyalt két rendszer és az alábbiakban majd sorra kerülő kétféle vivőérzékelő eljárásra kapott eredményeket. Az ábrázolt összefüggések alapján ezek a rendszerek jól összehasonlíthatók.

1.3 A véletlen hozzáférésű rádiócsatornák dinamikus viselkedése

A dinamikus viselkedés tanulmányozására számítógépes szimulációkat végeztek. Egy-egy ilyen vizsgálat során a következő viselkedés derült ki. A kezdetben üres rendszerből kiindulva, a csatornában egy idő múlva kialakult a kívánt csatornaátvitel, az eljárásra jellemző forgalom mellett. Ez az egyensúlyi állapot azonban véletlen fluktuációk következtében megszűnt, nagyobb G lépett fel, ami csökkentette az átvitelt, ez ismét növelte a forgalmat, s egy másik stabil állapot lépett fel, amelyre igen kis átvitel és megengedhetetlenül nagy csomagkésési idő volt jellemző, azaz a csatorna tulajdonképpen eldugult.

Az ilyen jellegű dinamikus viselkedés következtében a csatornák jellemzésére a késési idő-átvitel viszony önmagában nem elegendő, s szükség van a stabilitás-instabilitás fogalmának bevezetésére, alkalmas mérőszámok megválasztására és az egyes rendszerek analizálására. Rögzítsük pontosan a [11]-ben megvizsgált modellt és a szükséges definíciókat. Legyen a réselt ALOHA-csatornában a felhasználók száma, M , véges, s egy adott felhasználó az alábbi két állapot valamelyikében lehet:

1. Gondolkodó állapot, amelyben a terminál δ valószínűséggel generál és küld el csomagot egy adott időrésben,

2. Blokkolt állapot, amelyben a terminál egy kész csomagot tartalékol, amelynek elküldése nem volt sikeres, s így azt ismételni kell. Az ismétlési késleltetés legyen geometriai eloszlású. Tételezzük fel, hogy ismétlés az adott résben p valószínűséggel következhet be. Egy terminál egyszerre csak egy csomagot tárolhat.

Legyen n^t az adott t időpontban tartalékoltsomagok számát jelentő valószínűségi változó (a blokkolt terminálok száma), s^t pedig jelölje az új csomagok küldési gyakoriságát. Nyilvánvalóan

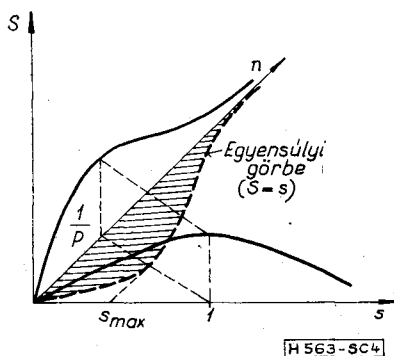
$$s^t = (M - n^t) \cdot \delta. \tag{8}$$

Az (n^t, s^t) vektort a csatorna állapotvektorának nevezzük. Időben állandó M és δ esetén n^t Markov-folyamat, stacionárius átmeneti valószínűségekkel.

Jelöljük a csatornaátvitelt S^t -vel, amely azonban most nem szükségképpen egyenlő s^t -vel, az új csomagok küldési gyakoriságával, mint az korábban, egyensúlyi állapotot feltételezve volt: annál nagyobb is, kisebb is lehet. A csatorna $s^t = s$ átvitelét $n^t = n$ és δ függvényében könnyen felírhatjuk mint annak a valószínűségét, hogy az adott időrésben pontosan egy csomagküldés történik:

$$S(n, \delta) = (1-p)^n (M-n) \delta (t-\delta)^{M-n-1} + n \cdot p (1-p)^{n-1} \cdot (1-\delta)^{M-n}. \tag{9}$$

A 4. ábrán felvázoltuk a fenti összefüggés által meghatározott felületet. Az $[n, s]$ síkon szaggatott



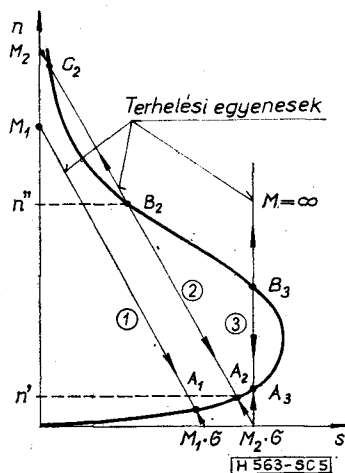
4. ábra. Ilusztráció a dinamikus viselkedés vizsgálatához.

vonallal bejelölt görbe pontjaira igaz, hogy $S = s$, azaz a rendszer egyensúlyban van. Ennek az egyensúlyi görbének egyik oldalán bevonalkázott területen $S > s$, azaz nagyobb az átvitel, mint a bemeneti új csomagsebesség — a különbség a korábról tartalékoltsomagok miatt adódik, a görbe másik oldalán $S < s$, a csatorna túl van terelve, kevesebb csomag jut át rajta, mint amennyi új keletkezik.

Az 5. ábrán az egyensúlyi görbét ábrázoltuk, valamint a (8) összefüggés által meghatározott terhelési egyeneseket néhány lehetséges helyzetben. Az egyeneseken levő nyilak a csatorna munkapontjának mozgási irányát mutatják, az előbb mondottaknak megfelelően $s > S$ esetén a nyilak növekvő n felé, $s < S$ esetén csökkenő n felé mutatnak.

Az A_1, A_2, A_3 pontok, valamint a C_2 pont stabil, B_2 és B_3 instabil egyensúlyi pontok. A csatornát [11] szerint stabilnak nevezzük, ha a terhelési egyenes csak egy pontban metszi az egyensúlyi görbét (1. eset), egyébként a csatorna instabil (2. és 3. eset). A 3. eset azt illusztrálja, hogy a végtelen terminálszámot magában foglaló modell mindig instabil. A bevezetőben említett szimulációs eljárások során az instabil ponton túlról, a második stabil pontból való visszatérés sohasem fordult elő, bár ennek természetesen nem nulla a valószínűsége.

A stabilitás, pontosabban az instabilitás mértékéül a biztos tartományból való első kilépés idejének várható értékét javasolták. A biztos terület az 5. ábrán



5. ábra. Ilusztráció a csatorna stabilitásának értelmezéséhez. 1. stabil, 2. és 3. instabil csatorna

nak megfelelően egy adott terhelési egyenes esetén az $n=0, 1, 2, \dots, n^*$ állapotoknak felel meg. A Markov-láncok elméletének felhasználásával az első kilépés idejének eloszlása és várható értéke meghatározható [11].

A tervezés során a fentiek szerint két lehetőségünk van:

- biztosítjuk azt, hogy a csatorna feltétlen stabil legyen (1. eset az 5. ábrán), és megelégszünk az így kiadódó kisebb terminálszámmal;
- instabil csatornát használunk (2. eset), amely több terminált szolgál ki adott megbízhatósággal (adott értékű első kilépési idővel).

Instabil csatorna stabilitása, azaz a biztos tartományban maradás szabályozással biztosítható. Egész egyszerűen szólva ez azt jelenti, hogy növekvő tartalék és csökkenő átvitel esetén az egyes terminálok növelik a késleltetési időt. Eddigi modellünkben pl. bevezethetjük azt a feltételt, hogy a terminálok egy adott időrésben vagy p_0 , vagy p_1 ($p_0 < p_1$) valószínűséggel ismételnék, a csatorna aktuális állapotától függően. Tétélezzük fel, hogy n^t a termináloknál minden pillanatban ismert. Ekkor kimutatható, hogy létezik egy (stacionárius) döntési szabály, amely maximálja az átvitelt és minimalja a késési időt. E szerint a szabály szerint a $p = \{p_0, p_1\}$ ismétlési valószínűség minden időpillanatban az aktuális csatornaállapotnak, n^t -nek egy n^* küszöbértékkel való összehasonlításával határozható meg:

$$p = \begin{cases} p_0 & \text{ha } n^t < n^*, \\ p_1 & \text{ha } n^t \geq n^*. \end{cases} \quad (10)$$

A csatorna állapota a termináloknál pontosan sohasem ismert, azonban azt a megfigyelt múltbeli viselkedés alapján becsülni lehet. Ilyen becslések felhasználásával közel optimális szabályozási algoritmusok készíthetők [11].

1.4 Vivőérzékelő eljárások tulajdonságai

A kapacitás vizsgálatokor, az 1.1 pontban voltaképpen egy csillag-hálózatot vettünk alapul, amelyben az egyes terminálok csak a központtal kívánnak kommunikálni. Egy ilyen hálózatban gyakran azt is feltételezhetjük, hogy a terminálok egymás adását is hallják. Ennek a körülménynek a kihasználása a rendszer hatékonyságát nagymértékben növelheti, hiszen sok sikertelen kísérlet maradhat el, ha a terminál a csomag elkészültekor értesül arról, hogy a csatorna foglalt, így a csomag elküldését elhalaszthatja valamilyen algoritmus szerint egy későbbi időpontig. Az effajta rendezettség bevitelle a rendszerbe végső soron a kapacitás növekedéséhez vezet. Ezeknél a rendszereknél is lényeges tulajdonságra mutatunk rá a véletlen hozzáférésű csatorna megjelölésével, mivel törekszünk ugyan az összeütközések számának csökkentésére, de azokat elkerülni nem tudjuk, és nincs is szándékunkban.

A vivőérzékelő eljárásoknál nyilván alapfeltétel az, hogy a terminál a csatorna jelenlegi állapotáról szerezzen tudomást, azaz a terjedési idő + érzékelési idő rövid legyen a csomaghosszhoz képest (ez a gyakor-

latban eleve kizárja az alkalmazást műholdas rendszerekben).

A vivőérzékelő módszerek tulajdonságai nagymértékben függenek attól az algoritmustól, amelyet a terminál követ a csatorna értékelése után. Az alábbiakban a lehetséges eljárások közül a [10]-ben ismertetett két algoritmust tekintjük, az ún. nem kitartó (a) és a kitartó (b) eljárásokat.

Az idézett eredmények levezetésénél a terjedési + érzékelési időt azonosnak tétélezték fel a rendszer valamennyi adó-vevő párára. Ez jó közelítéssel teljesül is a gyakorlatban, mivel a két komponens közül a lényegesen kisebb részt képviselő terjedési idő különbözhet csak jelentősen. Egyebekben az ALOHA-csatornák kapacitásának számításánál is felhasznált feltételek érvényesek.

A nem kitartó (a) algoritmus a következő:

1. Ha a csatorna szabad a csomag elkészülte után, azt a terminál elküldi.

2. Ha a csatorna foglalt, az adást elhalasztja egy (véletlen) késleltetési idővel, majd annak elteltével újból megnézi a csatornát, és a fentiek szerint jár el.

A csatornaátvitel-forgalom összefüggés itt is egyszerű megfontolások alapján vezethető le. A sebezhető periódus most az egyutas terjedési + érzékelési időnek felel meg. A továbbiakban ennek a T csomaghosszra normalizált megfelelőjét a -val jelöljük, mivel az első terminál csomagját a kezdettől számítva ilyen idő után már nem zavarják meg mások, foglaltnak érzékelve a csatornát.

Itt is célszerűnek bizonyul a sebezhető periódusnak megfelelő részekre osztani az időtengelyt. Ezek a korábban egységnyi, azaz csomaghossznyi rések helyett most a hosszú „minirések”. A rést nem kitartó vivőérzékelő eljárásra az alábbi összefüggés adódik [10]:

$$S = \frac{aGe^{-aG}}{1 - e^{-aG} + a} \quad (11)$$

Észrevehető és könnyen be is látható, hogy a csatorna kapacitása most függ az a paramétertől. Kellően kis a esetén az ALOHA-típusú csatornánál jóval nagyobb kapacitás érhető el: $a=0,1$ -re, $S_{\max}=0,52$, $a=0,01$ -re, $S_{\max}=0,81$.

A (b) kitartó algoritmus a következő:

1. Ha a csatorna szabad, a terminál elküldi az elkészült csomagot.

2. Ha a csatorna foglalt, a terminál vár amíg fel szabadul, és akkor küldi el a csomagot.

A kitartó eljárás rést változatára a következő összefüggés ismert:

$$S = \frac{Ge^{-G(1+a)}[1 + a - e^{-aG}]}{(1+a)(1 - e^{-aG}) + ae^{-G(1+a)}} \quad (12)$$

$a=0,1$ esetén most $S_{\max}=0,45$, $a=0,01$ -re $S_{\max}=0,54$ adódik. Ezek az értékek lényegesen nagyobbak az ALOHA-csatornákra jellemző értékeknél (1. az 1. ábrát). Az igazi összehasonlítási alapot jelentő esomag késési idő – átvitel összefüggések is a vivőérzékelő eljárások előnyét mutatják; a korábbi 2. ábrán feltüntetettük az (a) és (b) algoritmusra [10]-ben közölt szimulációs eredményeket.

1.5 Összehasonlítás a frekvencia- és időosztásos multiplex rendszerekkel

Már utaltunk arra, hogy a véletlen hozzáférésű (tulajdonképpen: véletlen időosztásos) rendszerek nagy számú, egyenként kis aktív idejű terminálokat hatékonyabban képesek kiszolgálni a fix frekvenciaosztásos (FDMA) és időosztásos (TDMA) rendszereknél. E pontban a viszonyokat mennyiségileg is megmutatjuk, lényegében a [12]-ben közölt módon.

Kiindulási feltételeink

- a rendszer M terminálból áll,
- az egyes termináloknál az új csomagok generálása Poisson-folyamatnak megfelelően λ csomag/s sebességei történik, a csomagok hossza b bit,
- egy V bit/s sebességű csatorna áll rendelkezésre, amely tetszés szerint osztható fel,
- FDMA-nál a csatornák között szükséges védősávokat, TDMA-nál a szinkronizáláshoz szükséges időket elhanyagoljuk.

Összehasonlításra az átlagos csomagkésési időt használjuk.

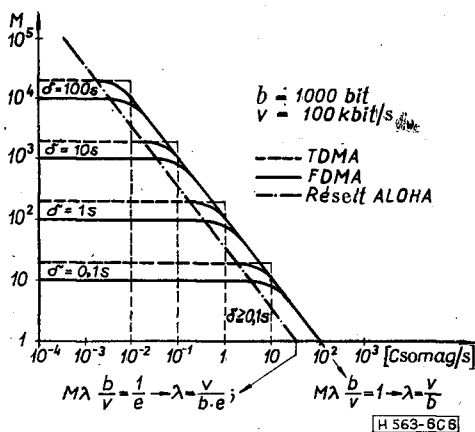
Mivel általában nem tételezhetjük fel, hogy a csomagok generálása állandó λ csomag/s sebességgel történik, a termináloknál szükség van sorbaállításra. E sor kis aktivitás esetén nagy valószínűséggel üres, nagy aktivitás esetén azonban lesznek olyan időszakok, amelyekben az átlagosnál több csomag generálódik, így azok az FDMA-, ill. TDMA csatornába való kijutás előtt bizonyos időt a sorban is töltenek.

FDMA-rendszerrel a csomagkésési idő a sorban eltöltött idő és a kiszolgálási idő összege:

$$\delta = \frac{M^2 \lambda b}{2V^2 \left(1 - \frac{M \lambda b}{V}\right)} + M \frac{b}{V} \quad (13)$$

Az összeg első tagját az $M/D/1$ típusú sorokra ismert összefüggésbe [7] való behelyettesítéssel nyertük, a második tag a csomagnak a csatornán való átjutásának ideje.

TDMA-nál a rendszerben eltöltött idő három komponensből áll: a sorbanállás idejéből, a következő



6. ábra. Összehasonlítás az idő- és frekvenciaosztásos rendszerekkel

saját időreig eltelő átlagos időből és a csatornán való átjutás idejéből:

$$\delta = \frac{M^2 \lambda b}{2V^2 \left(1 - \frac{M \lambda b}{V}\right)} + \frac{M}{2} \frac{b}{V} + \frac{b}{V} \quad (14)$$

A véletlen hozzáférésű rendszerek közül a résett ALOHA-t tesszük összehasonlítás tárgyává, mivel a csomagkésési idő az S átvitel függvényében itt analitikusan is megadható (l. pl. [12]-ben).

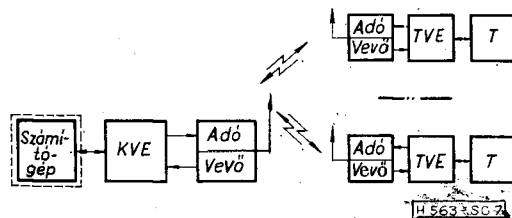
A viszonyok érzékelésére legcélszerűbb a konstans δ -nak megfelelő $M=f(\lambda)$ összefüggést ábrázolni (6. ábra). A résett ALOHA-csatornában az adott késleltetésnek megfelelő $S = M \cdot \lambda \cdot \frac{b}{V}$ átvitel konstans érték, így az ábrázolt összefüggés az ennek megfelelő egyenes.

Az ábrán jól látható, hogy pl. $\delta=0,1$ s esetén kis aktivitású terminálokból a véletlen hozzáférésű rendszer nagyságrendekkel többet képes kiszolgálni, mint akár az idő-, akár a frekvenciaosztásos rendszer. E két utóbbi között egyébként a különbség kb. 2-szeres faktor a TDMA javára.

2. Példák gyakorlati alkalmazásokra

2.1 Az ALOHA-rendszer néhány jellegzetessége

A bevezetőben is említett ALOHANET volt tudomásunk szerint az első, nemzetközileg publikált véletlen hozzáférésű rádiócsatornát alkalmazó számítá-



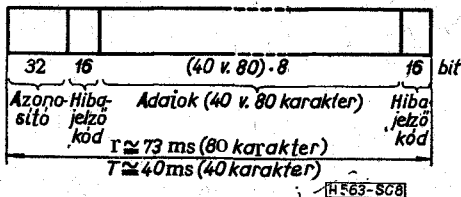
7. ábra. Az ALOHA-rendszer központjának és termináljainak egyszerűsített tömbvázlata

technikai hálózat, amely a Hawaii Egyetemen létesült. Ebben a pontban elsősorban azokat a jellegzetességeket foglaljuk röviden össze, amelyek hasonló rendszerek tervezésekor hasznosak lehetnek, és a következő pontban tárgyalt rendszerterv kialakításánál is kiinduló pontként szolgáltak.

Az ALOHA-rendszer eredetileg egy csillag-hálózat volt, amelyet később ismétlőállomások és műholdas rendszerekbe való bekapcsolódások jelentősen módosítottak. A rendszer központjának és termináljainak leegyszerűsített tömbvázlata a 7. ábrán látható.

A központi vezérlőegység (egy HP 2100 típusú kis-számítógép) kapuként szolgál a rendszer termináljai és számítóközpontja között, ill. ezen keresztül van lehetőség műholdon keresztül más rendszerekkel való kommunikációra is.

Valamennyi terminált (függetlenül azok konkrét formájától: teletype-ok, display-k, minikomputerek lehetnek terminálok) egy terminálvezérlő egység kapcsol be a rendszerbe.



8. ábra. Az ALOHA-rendszerben alkalmazott adatcsomag felépítésének egyszerűsített vázlata

A terminálvezérlő egység feladatai

- csomagképzés (fej rész és hibajelző kód hozzáadása),
- adás és a késleltetett ismétlések vezérlése,
- a visszajelzések és a terminálnak szóló üzenetek felismerése és továbbítása.

Az alkalmazott csomagstruktúrát a 8. ábra mutatja. Lehetőség van egész (80 karakteres) és fél (40 karakteres) csomagok képzésére. Az időadat 9600 bit/s átviteli sebességnek felel meg.

A központi vezérlőegység vezérli a teljes üzenetforgalmat. Feladatai mindenekelőtt:

- a sikeresen beérkezett csomagok felismerése, visszajelzés generálása,
- a számítóközponttól a terminálok felé irányuló üzenetek sorbaállítása valamilyen prioritási séma szerint,
- a visszajelzések számára ezekkel szemben előbbség biztosítása.

Az összeütközött csomagok ismétlési algoritmus és egyúttal egy egyszerű módszer a csatorna stabilitásának biztosítására a következő. Az ismétlési késleltetés kb. 10 csomaghossznyi időn belül (0,7 s) egyenletesen sorolódik. A terminálvezérlő automatikusan háromszor ismételi, s ha a harmadik kísérlet is sikertelen, jelzést ad a kezelőnek, aki az újabb ismétlést kézivezérléssel indíthatja el. Ez egyben azt jelenti, hogy nagy forgalom esetén igen hosszú késleltetési időt iktat be a terminál.

Egyszerűen megbecsülhetjük, hogy a csatorna kb. hány aktív terminált szolgálhat ki, stabil csatornát feltételezve és eltekintve a csomagkésési időtől. Egy-egy terminál aktivitását (S_1 csomag/s $\rightarrow S_1$ csomag/T s) kb. percenként egy csomagra becsülhetjük (1 sor leírása a display-n a szóban forgó interaktív alkalmazásokban átlagosan kb. 1 perc). Ekkor az

$$S_{max} = MS_1 = MS_1 T, \quad S_{max} = \frac{1}{2e}, \quad (15)$$

összefüggésekből a 9600 bit/s sebességű csatornának megfelelő ≈ 73 ms csomaghossz esetén

$$M = \frac{1}{2e \cdot S_1 T} \approx 154,$$

adódik.

2.2 Véletlen hozzáférésű rádióterminálok alkalmazása számítógépes kardiológiai ktsérletekben

Számítógéppel segített kardiológiai vizsgálatokban a számítógép egy már meglévő adatbank felhasználá-

lásával feldolgozza a beteg EKG-információját és segíti az orvost a diagnózis megállapításában. Mivel az EKG-vizsgálatok a szokásos klinikai, szakorvosi gyakorlaton túl a megelőzésben is fontos szerepet játszanak, a jövőben tömeges szűrővizsgálatokra is egyre inkább fel kell készülni. Ezért az ehhez szükséges és hasonló célú számítógépes távadat-feldolgozó rendszerek tervezése aktuális feladat.

Az ilyen rendszerekben is több terminál távoli hozzáférést kell biztosítani egy központi számítógéphez. Kis számú állandó helyű terminál esetén még célszerű lehet telefonvonalakkal biztosítani az összeköttetéseket. Nagyobb és változó elhelyezkedésű terminálszámmal és továbbfejlesztésnél azonban igen előnyösen használhatjuk ki azt a jellegzetességet, hogy az EKG-vizsgálat ideje jóval nagyobb az EKG-információ és a kísérőinformáció továbbításához szükséges időnél, mégpedig véletlen hozzáférésű rádiócsatorna alkalmazásával. A fő gyakorlati előnyök, nevezetesen, hogy:

- a rendszer rugalmasan telepíthető és bővíthető,
- kommunikációs vonalak bérleti vagy használati díja lényegesen kisebb,
- az összeköttetések a bérelt vonalak kötetlenségével és biztonságával használhatók,

különösen nagyvárosi körülmények között lehetnek lényegesek.

A véletlen hozzáférésű rádiócsatornát a Budapesti Távközlési Kutató Intézet ESz 1010 alapú kísérleti kardiológiai rendszere [14] számára dolgoztuk ki, amelyben az orvosi terminálok (OT) és a központi berendezés (KB) közötti összeköttetést kapcsolt telefonvonalon valósították meg. Az orvosi terminál egyik üzemmódjában alfanumerikus display és modem alkalmazásával kísérőinformáció továbbítható, a másikon a vektorkardiográf három analóg jele, egy-egy alkalmasan megválasztott segédvívó frekvenciamodulációja (tehát FM/FDM-eljárás) segítségével.

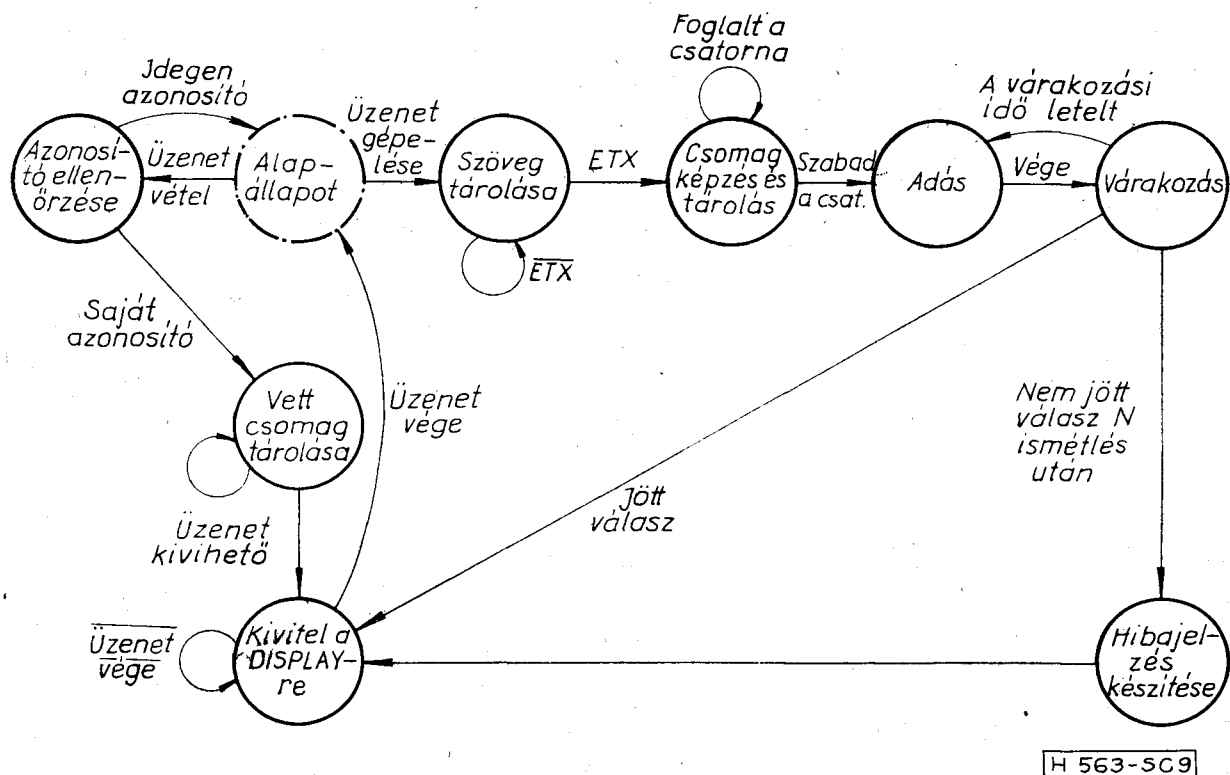
A többszörös hozzáférésű rendszer tervezése során figyelembe vettük az üzenetfajtát és az alkalmazható rádiócsatorna jellegzetességeit, és két változattal kísérleteztünk. A kiindulási feltételek:

a) Az OT kétfajta üzenetet küld, amelynek adatai a jelenlegi vizsgálati körülményeknek megfelelően:

- a kísérőinformáció (a beteg kódja, adatai, egy kérdőívre adott válaszai, járulékos vizsgálati eredmények) egy 80 karakteres display sornak felel meg, azaz az alkalmazott aszinkron üzemmódban 880 bitnek. Ezt az ALOHA-csomaghoz hasonlóan fejléccel és hibajelző kóddal ellátva, (10-15%) kb. 1000 bit hosszúságú csomag adódik,
- az analóg EKG-üzenet hossza 15 s.

b) A rendelkezésre álló rádiócsatorna-kapacitást, pontosabban az alkalmazható adatátviteli sebességet az határozza meg, hogy alkalmazkodni kell a frekvenciakiosztáshoz, valamint célszerű gyári rádiótelefon készüléket alkalmazni, lehetőleg kevés módosítással. Itt alapvetően két lehetőségünk van:

1. A rádiótelefont telefoncsatornához hasonlóan használjuk fel, azaz a modem jele a hangfrekvenciás moduláló jel. Így csekély módosítással könnyen érhetünk el 1200 bit/s sebességet, ennél nagyobb az azon-



9. ábra. EKG-rádióterminál vezérlő egységének állapotdiagramja

ban csak a sávot jobban kihasználó, de bonyolultabban megvalósítható modulációs eljárások alkalmazásával.

2. Az adó/vevő fő egységeit felhasználva közvetlen digitális modulációt valósítunk meg. Figyelembe véve az URH-sávban rögzített 25 kHz-es csatornatávolságot, 10 kbit/s vagy ennél nagyobb sebességet könnyen elérhetünk, pl. egyszerű bináris DPSK-t alkalmazva.

Mindezek alapján a két változat a következő lesz.

1200 bit/s átviteli sebesség, analóg EKG-átvitel alkalmazása

A fenti adatok alapján a kísérőadat-csomag kb. 0,83 s, az EKG-üzenet 15 s idejű, tehát a két üzenetfajta ideje nagyon eltérő. Ezért a kísérőadat-csomagok a központot véletlen hozzáférésű csatornán érik el, vivőérzékelő eljárást alkalmazva, az EKG-üzeneteknek pedig mindig szabad utat biztosítunk. A központi vezérlőegység nyugtázó üzenete egyúttal az adott terminálnak EKG-engedélyt, a többinek pedig tiltást jelent. Ebben a változatban tehát az EKG-felvétel és az EKG-jel továbbítása csak akkor indul meg, ha erre engedély érkezett.

Az üzenetforgalom irányítását az ALOHA-rendszer koncepciójához hasonlóan a terminálvezérlő egység és a központi vezérlőegység végzi. A fenti eljárást megvalósító algoritmust a terminálvezérlő oldalról a 9. ábra állapotdiagramja mutatja meg részletesebben. Az ábrán a legegyszerűbb, kitaró vivőérzékelő eljárás alkalmazását látjuk. A terminálvezérlő funkcióinak mikroprocesszorral való megvalósítása esetén azonban más, az eddig közltekénél hatékonyabb vivőérzékelő eljárások is rugalmasan kipróbálhatók [15].

9600 bit/s vagy ennél nagyobb sebesség, digitális EKG-átvitel

Ha az OT-ben analóg/digitális átalakítást és adatkompressziót valósítunk meg, akkor az EKG-jelek is csomagok formájában továbbíthatók. A jelenlegi rendszer adatainak (300 Hz-es mintavételi sebesség, 256 szintre kvantálás) és egy már kidolgozott adatkompressziós eljárásnak kb. 5-szörös megtakarítást eredményező 2,25 s csomaghosszúság adódik, így most már az EKG-információ is egyszerűen tárolható, és nincs szükség feltétlenül az EKG-üzenetek engedélyezésére.

Összefoglalás

Jelen munka célja a véletlen hozzáférésű rádiócsatornát alkalmazó kommunikációs hálózatok fő jellegzetességeinek összefoglalása, a gyakorlati alkalmazási lehetőségek megmutatása volt. E rendszerek elmélete még távolról sem tekinthető befejezettnek, s a nyitva álló kérdésekre összefoglalásunk rövidege miatt még utalni sem tudtunk. Úgy tűnik azonban, hogy az ismertett két gyakorlati alkalmazási példa, a már működő ALOHA-rendszer és a méreteiben jóval kisebb, speciális célú kísérlet jól illusztrálja a véletlen hozzáférésű rádióterminálok alkalmazásának előnyeit és perspektíváit.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki dr. Csibi Sándor egyetemi tanár, intézetigazgatónak a cikk tárgyához csatlakozó kutatási-fejlesztési téma irányításáért, s

a cikk írása során nyújtott segítségével, valamint Dallos György egyetemi adjunktusnak, hasznos észrevételeiért.

IRODALOM

- [1] Kleinrock, L.: Queueing Systems, vol. II. Computer Applications. Wiley, New York, 1976.
- [2] Abramson, N.—Kuo, F.: Computer-Communication Networks. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1973.
- [3] Abramson, N.: The Theory of Packet Broadcasting. The Aloha-System, B76-1, January, 1976.
- [4] Schroeder, M. R.: Nonsynchronous Time Multiplex System for Speech Transmission. Bell. Lab. Memo 19. January 1959.
- [5] Roberts, L. G.: Multiple Computer Networks and Inter-Computer Communication. Proc. of the ACM Symp. on Operating Systems, Gatlinbourg, Ten., 1967.
- [6] Abramson, N.: The ALOHA-System — Another Alternative for Computer Communication. AFIPS Conf. Proc. vol. 37, 1970.
- [7] Kleinrock, L.: Queueing Systems, vol. I. Theory. Wiley, New York, 1975.
- [8] Gnedenko, B. V.: Vvedenije v teoriju masszovogo obszluzivaniija. Moszkva, „Nauka”, 1966.
- [9] Kleinrock, L.—Lam, S.: Packet Switching in a Slotted Satellite Channels. AFIPS Conf. Proc. vol. 42, 1973.
- [10] Kleinrock, L.—Tobagi, F.: Packet Switching in Radio Channels: Part I. — Carrier Sense Multiple Access Modes and their Throughput-Delay Characteristics. IEEE Tr. on Com., vol. 23, N° 12, December, 1975.
- [11] Kleinrock, L.—Lam, S.: Packet Switching in a Multi-access Broadcast Channel: Performance Evaluation. IEEE Tr. on Com., vol. 24. N° 8, August 1976.
- [12] Lam, S. S.: Packet Switching in a Multi-access Broadcast Channel. UCLA-ENG-7429, March 1974.
- [13] Dallos Gy.—Györi J.—Szabó Cs.: Kísérleti rádióterminál szolgálat. TKI—BME/HEI, 1976.
- [14] Csapody Cs.—Shakin, V. V.—Kobzos L.—Balog B.: Szisztema dija obrobotki EKG na maloj EVM szo mnogimi on-lajn terminalami. Tez. doki. III. Moszkva-Puscino, 1976.
- [15] Dallos Gy.: Egyszerű és hatékony módszer interaktív terminálok többszörös hozzáférésére számítógéphez. Preprint, Budapest, 1977.
- [16] Shakin, V. V.—Breuer P.: Adaptive least-squares spline fitting the vectorial signals. Proc. Conf. “Digital Signal Processing”, Florence, 1975.